

ESTUDO DA ESPESSURA DAS CAMADAS DE BETONAGEM E DO RITMO DE CONSTRUÇÃO DE UMA BARRAGEM ABÓBADA DE GRANDES DIMENSÕES

MANUEL FERREIRA DE LEMOS BASTOS CARDOSO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professor Doutor Manuel Maria Basílio Pinho de Miranda

Professor Doutor Rui Manuel Carvalho Marques de Faria

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miiec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

*In order to succeed, your desire for success should
be greater than your fear of failure.*

Bill Cosby

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos Professores Manuel Pinho Miranda e Rui Faria por terem sido meus orientadores e terem estado dispostos a ajudar-me e a esclarecer-me em qualquer altura.

Em especial ao Professor Manuel Pinho Miranda por toda a dedicação que demonstrou ao longo do tempo em que realizei o meu trabalho, pela motivação que sempre me transmitiu e pelos conselhos que apenas um Mestre me saberia dar.

Ao Professor Rui Faria agradeço profundamente ter-me permitido a utilização do *software* DIANA, sem o qual não seria possível realizar nenhum dos estudos presentes nesta dissertação.

Gostaria também de agradecer à LABEST, em especial ao Engenheiro José Conceição, pelas inúmeras dicas e pela paciência demonstrada ao longo da minha aprendizagem no programa utilizado.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer ao departamento de Matemática, principalmente ao Professor Vítor Sousa e à Professora Ana Faustino, pela ajuda prestada na elaboração do meu programa em MATLAB.

Por último, gostaria de agradecer à minha família que esteve sempre presente e que tornou possível que eu concluísse o curso, direcionando-me nem sempre no caminho mais fácil, mas sempre no caminho mais correto.

Não poderia deixar de agradecer à Mariana, que sempre foi um apoio e que me deu força e transmitiu inspiração para conseguir elaborar esta dissertação.

RESUMO

As barragens são estruturas que se opõem ao movimento natural dos rios. Estas, para além de proporcionarem o armazenamento de água, têm outras funções, tais como: satisfação das necessidades das povoações envolventes (abastecimento e irrigação), a regularização do caudal dos rios e produção de energia elétrica.

Nas barragens de betão, devido ao moroso processo construtivo, o plano de betonagem deve ser minuciosamente elaborado com o objetivo de minimizar os tempos de construção mantendo padrões de qualidade adequados. Dessa forma, a entidade exploradora pode conseguir atrasar o investimento inicial ou antecipar a entrada em serviço do aproveitamento, maximizando o lucro possível durante o período de concessão atribuído.

Sendo assim, na presente dissertação foi analisada uma alternativa ao plano de betonagem da estrutura, fazendo variar a espessura das camadas de betonagem, o que permite reduzir o tempo de construção e consequentemente antecipar a conclusão da obra e o início da sua exploração.

Deste modo, foram elaborados dois modelos, sendo o primeiro referente ao plano de betonagem que está a ser concretizado em que se adota camadas de betonagem com espessura máxima de 2 metros e o segundo, definido com base no mesmo plano de betonagem, mas em que se aumenta a espessura das camadas de betonagem para 4 metros.

Recorrendo ao *software* DIANA procedeu-se à análise térmica e mecânica dos dois modelos, tendo como base os fenómenos associados ao betão nas primeiras idades, tais como a evolução das suas propriedades resistentes, a libertação do calor do cimento, a fluência, a retração e a maturação. Devido às elevadas temperaturas atingidas pelo betão durante a fase de hidratação do cimento, procedeu-se também ao estudo de modelos de refrigeração artificial do betão normalmente utilizados neste tipo de estruturas.

Através dos modelos elaborados é possível concluir que se houver particular cuidado com alguns dos fatores que condicionam a geração de tensões de origem térmica, a hipótese de utilização de camadas de 4 metros é válida. Isto deve-se ao facto de nos casos de estudo apresentados, os valores das trações, apesar de superiores, estarem próximas da resistência à tração do betão em causa. Admite-se assim, que se o fabrico do betão for alterado de modo a baixar a sua temperatura de colocação, se as condições de cura forem mais propícias e ainda se existir um maior rigor e monitorização do processo construtivo é possível atingir espessuras de camadas de betonagem na ordem dos 4 metros no processo de construção de barragens.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens Abóbada, Betão, Calor de Hidratação, Faseamento Construtivo, Análise Térmica, Análise Mecânica.

ABSTRACT

Dams are mass concrete structures that act against the water's natural flow. Beyond the purpose of water storage, dams may be capable of many other functions such as regularization of the water flow, electrical power production or even to fulfil the surrounding population's necessities.

In concrete dams, due to arduous construction processes, the concreting planning should be done in order to minimize the construction time. Therefore the operating entity may not only be able to return the initial investment, but also make use of the best possible profit, as soon as possible.

Throughout this dissertation, a study was made about the alteration in the concreting planning of the structure, changing the thickness of the concrete layer, obtaining a reduction of the concreting time and anticipating the dam exploration.

During this semester we developed two models. The first model is related to a project proposed to EDP during public tender fase with a maximum layer thickness of 2 meters. On a different case scenario we created a second model based on the concrete planning of the first model, changing only the maximum layer size to 4 meters.

In this study we use the *software* DIANA in which calculations were made, including a thermal analysis and a mechanical analysis of the two models. This study also considers the concrete early age phenomenon, as it represents the evolution of the resistant properties, heat generation, creep, shrinkage and maturity.

The study also looks at mass concrete cooling systems, mainly embedded cooling pipes, due to high temperatures generated in the concrete during the hydration fase.

With the results obtained in the two models it is possible to conclude that if some factors that influence the tensions were changed to more favourable values, our initial hypothesis is valid. We can also conclude that despite the fact that the tensions in the stress maps are above the maximum resistance values, they are very close to the limit.

If the concrete production was modified in order to minimize the concreting temperatures, as well as the curing conditions together with more accuracy and monitoring during the construction process, we can adopt the thickness of 4 meters as a maximum value.

KEYWORDS: Arch Dams, Concrete, Heat of Hydration, Construction Phasing, Thermal Analysis, Mechanical Analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. Barragens Abóbada	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	1
1.3. PROPÓSITO DA EXISTÊNCIA DE UMA BARRAGEM	2
1.4. TIPOS DE BARRAGENS DE BETÃO	2
1.5. DEFINIÇÃO DA FORMA	4
1.5.1. ARCOS CIRCULARES DE RAIOS CONSTANTES	4
1.5.2. ARCOS CIRCULARES DE ÂNGULO CONSTANTE	4
1.5.3. ARCOS DE RAIOS E ÂNGULO VARIÁVEIS	5
1.6. FATORES QUE CONDICIONAM A FORMA DE UMA BARRAGEM ABÓBADA	6
1.6.1. FUNDAÇÃO	6
1.6.2. CHEIAS	6
1.6.3. EFEITOS CLIMÁTICOS	6
1.6.4. SIMETRIA	7
1.6.5. REGULAMENTO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS	7
2. Problema Térmico	9
2.1. INTRODUÇÃO	9
2.2. PROCESSOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR	9
2.2.1. CONDUÇÃO	9
2.2.2. CONVECÇÃO	13
2.2.3. RADIAÇÃO	14
2.3. CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	16
2.3.1. GERAÇÃO DE CALOR	16
2.3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	19
2.3.2.1. Calorimetria Adiabática	19
2.3.2.2. Calorimetria Semi-adiabática	19

2.3.2.2. Calorimetria Isotérmica	20
2.3.3. REDUÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO	20
2.3.4. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NA RESISTÊNCIA DO BETÃO	21

3. Problema Mecânico

3.1. INTRODUÇÃO	23
3.2. GRAU DE HIDRATAÇÃO	23
3.3. MATURAÇÃO	24
3.4. FLUÊNCIA	26
3.5. RETRAÇÃO	28
3.5.1. RETRAÇÃO DE CARBONATAÇÃO	28
3.5.2. RETRAÇÃO DE SECAGEM	29
3.5.3. RETRAÇÃO AUTOGÊNEA	29
3.6. BETÃO EM MASSA.....	30
3.6.1. ARREFECIMENTO DE UMA BARRAGEM.....	30
3.6.2. SERPENTINAS DE REFRIGERAÇÃO	31
3.6.3. EFEITO DE UMA REDE DE SERPENTINAS DISPOSTAS EM NINHO DE ABELHAS	32
3.6.4. MODELO DE SERPENTINAS.....	34

4. Aproveitamento Hidrelétrico do Baixo Sabor

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO	39
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA FORMA	40
4.2.1. DEFINIÇÃO ANALÍTICA	40
4.2.2. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA – CICLO MATLAB	42
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO.....	45
4.3.1. TIPOS DE BETÃO A APLICAR AOS ELEMENTOS DA BARRAGEM	45
4.3.2. TEMPERATURA EM REGIME ADIABÁTICO.....	46
4.4. MODELO	47
4.4.1. GEOMETRIA.....	47
4.4.2. PROCESSO CONSTRUTIVO	48
4.4.3. MALHA	48
4.4.4. APOIOS	50
4.5. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....	50

4.5.1. CARACTERÍSTICAS DO BETÃO	50
4.5.1.1. Geração de Calor	50
4.5.1.2. Transmissão de Calor	50
4.5.1.3. Temperatura de Colocação do Betão	52
4.5.1.4. Propriedades Resistentes	53
4.5.1.4.1. Evolução da Resistência à compressão	53
4.5.1.4.2. Evolução da Resistência à tração	54
4.5.1.4.3. Evolução do Módulo de Elasticidade	54
4.5.1.5. Fluência	55
4.5.1.6. Retração	56
4.5.2. CARACTERÍSTICAS DA FUNDAÇÃO	56
4.5.2.1. Transmissão de Calor	56
4.5.2.2. Propriedades Resistentes	56
4.6. CARACTERIZAÇÃO DAS AÇÕES.....	57
4.6.1. PESO PRÓPRIO	57
4.6.2. TEMPERATURA DO AR	57
 5. Resultados do Modelo e Aplicação.....	58
5.1. INTRODUÇÃO	58
5.2. RESULTADOS DO MODELO TÉRMICO	58
5.3. RESULTADOS DO MODELO MECÂNICO	63
5.4. MODELO MODIFICADO	69
 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	72
6.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	72
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1 – Three Gorges Dam, China – Barragem de Gravidade (CNCLD, 2011)	2
Fig.1.2 – Barragem de Pracana – Barragem de Contrafortes (CNPGB, INAG)	3
Fig.1.3 – Kölnbrein Dam, Áustria – Barragem Abóbada de Dupla Curvatura (ANCLD, 2011).....	4
Fig.1.4 – Corte e Planta de uma Barragem definida através de arcos circulares de raio constante (Batista, 1998)	4
Fig.1.5 – Corte e Planta de uma Barragem definida através de arcos circulares de ângulo constante (Meliço, 2010)	5
Fig.1.6 – Corte e Planta de uma Barragem definida através de arcos de raio e ângulo variáveis (Batista, 1998)	5
Fig.2.1 – Processos de Transmissão de Calor (Azenha, 2009)	9
Fig.2.2 – Experiência Fundamental (Teles, 1985)	10
Fig.2.3 – Linhas Isotérmicas	10
Fig.2.4 – Fluxo de Calor num Volume Infinitesimal (Azenha, 2009).....	12
Fig.2.5 – Transmissão de Calor por Radiação.....	14
Fig.2.6 – Taxa de Geração de Calor para o CEM I 52.5R (Silva, 2007)	16
Fig.2.7 – Calor Gerado Acumulado para o CEM I 52.5R (Silva, 2007)	16
Fig.2.8 – Taxa de Geração de calor em função do Grau de Geração de calor (Azenha, 2009)	17
Fig.2.9 – Taxa de Geração de Calor Normalizada (Azenha, 2009).....	18
Fig.2.10 – Curva Adiabática	19
Fig.2.11 – Evolução da Resistência à compressão do betão para diferentes temperaturas de cura (Brooks, 2007)	21
Fig.3.1 – Evolução das Propriedades do Betão com o grau de hidratação (Azenha, 2004).....	24
Fig.3.2 – Evolução das Propriedades do Betão com a idade equivalente (Ji, 2008)	26
Fig.3.3 – Deformação por Fluência (Batista, 1998)	28
Fig.3.4 – Representação das serpentinas em ninho de abelhas (Stucky, 1957)	32
Fig.3.5 – Princípio da Conservação de energia (Kim e Yang, 2000).....	33
Fig.3.6 – Manipulação da Curva Adiabática do Betão.....	34
Fig.3.7 – Modelo Tridimensional do Bloco de Betão com serpentinas	35
Fig.3.8 – Planta do Modelo Tridimensional do Bloco de Betão com serpentinas.....	35
Fig.3.9 – Grau de Refrigeração em função do espaçamento das serpentinas (Stucky, 1957)	36
Fig.3.10 – Representação Tridimensional do Campo de Temperaturas no bloco de betão	37
Fig.3.11 – Representação Tridimensional do Campo de Temperaturas na serpentina	37
Fig.3.12 – Curva adiabática obtida a partir do modelo tridimensional de serpentinas	38

Fig.3.13 – Curva adiabática obtida a partir da manipulação de geração de calor do betão	38
Fig.4.1 – Aproveitamento Hidroelétrico de Baixo Sabor – Escalão de Montante (EDP, 2007)	40
Fig.4.2 – Evolução das Leis definidoras da Geometria (EDP, 2007).....	41
Fig.4.3 – Ciclo de definição da Geometria da Barragem	42
Fig.4.4 – Vista em Alçado da Barragem	44
Fig.4.5 – Vista Geral da Barragem.....	44
Fig.4.6 – Vista em Planta da Barragem	44
Fig.4.7 – Tipos de betão a aplicar nos diferentes elementos da barragem – corte transversal (Sousa, 2011)	45
Fig.4.8 – Calor Libertado Acumulado devido à hidratação do cimento	46
Fig.4.9 – Modelo Tridimensional da barragem.....	47
Fig.4.10 – Elemento de 20 nós – Elemento Mecânico	49
Fig.4.11 – Elemento de 8 nós – Elemento Térmico	49
Fig.4.12 – Malha de elementos finitos utilizada (última fase do modelo de 4 metros)	49
Fig.4.13 – Curva adiabática do betão do modelo	50
Fig.4.14 – Coeficiente de convecção em função da velocidade do vento (Azenha, 2009)	51
Fig.4.15 – Analogia entre a resistência elétrica e a transferência de calor nas superfícies fronteira (Azenha, 2009)	51
Fig.4.16 – Temperatura de colocação do betão	52
Fig.4.17 – Evolução da resistência à compressão com o tempo.....	53
Fig.4.18 – Evolução da resistência à tração com o tempo	54
Fig.4.19 – Evolução do módulo de elasticidade com o tempo.....	55
Fig.4.20 – Temperatura do ar.....	57
Fig.5.1 – Campo de Temperaturas do Modelo de Projeto na fase 10	59
Fig.5.2 – Campo de Temperaturas do Modelo de Projeto na fase 17 no instante inicial	59
Fig.5.3 – Campo de Temperaturas do Modelo de Projeto na fase 17 no instante final.....	60
Fig.5.4 – Campo de Temperaturas do Modelo de Projeto na fase 36	60
Fig.5.5 – Campo de Temperaturas do Modelo Alterado na fase 10	61
Fig.5.6 – Campo de Temperaturas do Modelo Alterado na fase 17 no instante inicial	61
Fig.5.7 – Campo de Temperaturas do Modelo Alterado na fase 17 no instante final.....	62
Fig.5.8 – Campo de Temperaturas do Modelo Alterado na fase 25	62
Fig.5.9 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo de Projeto na fase 10	63
Fig.5.10 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo de Projeto na fase 10	64
Fig.5.11 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo de Projeto na fase 17	64

Fig.5.12 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo de Projeto na fase 17	65
Fig.5.13 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo de Projeto na fase 42	65
Fig.5.14 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo de Projeto na fase 42 – Escala Alterada	66
Fig.5.15 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo Alterado na fase 10	66
Fig.5.16 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo Alterado na fase 10	67
Fig.5.17 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo Alterado na fase 17	67
Fig.5.18 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo Alterado na fase 17	68
Fig.5.19 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo Alterado na fase 25	68
Fig.5.20 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo Alterado na fase 25 – Escala Alterada	69
Fig.5.21 – Curva Adiabática do Betão – Aumento Arrefecimento Artificial.....	69
Fig.5.4 – Campo de Temperaturas do Modelo Modificado na fase 25	70
Fig.5.19 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo Modificado na fase 25	70
Fig.5.20 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo Modificado na fase 25 – Escala Alterada	71

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 – Leis definidoras dos parâmetros p_z e a_z	41
Quadro 4.2 – Leis definidoras dos parâmetros e_0 e A	41
Quadro 4.3 – Coeficientes para a Lei da Dupla Potência na Barragem de Pretarouca (Azenha, 2009)	55
Quadro 4.4 – Coeficientes para a Lei da Dupla Potência utilizados no Modelo	55

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

A	Área atravessada pelo fluxo de calor; Constante de proporcionalidade – Lei de Arrhenius; Lei de crescimento das espessuras para as nascenças
a_z	Diretriz vertical do arco de fecho
α	Absorvidade; Grau de Hidratação
$\alpha(t)$	Grau de hidratação do cimento no instante t
α_0	Grau de hidratação do cimento no instante inicial
$\alpha_{m\acute{a}x}$	Máximo grau de hidratação
α_T	Difusibilidade térmica
α_{cT}	Coefficiente de dilatação térmica
B_{cc}	Coefficiente que depende da idade do betão t
C	Conteúdo em peso de cimento no betão
c	Calor específico
D	Diâmetro da serpentina
ΔT	Variação de temperatura
ΔP	Perdas de calor
e	Espessura
E	Módulo de elasticidade
E_c	Módulo de elasticidade do betão
E_a	Energia de ativação aparente
E_{ct}	Módulo de elasticidade em tração
ε	Extensão; Emissividade
$\varepsilon_0(t)$	Extensão independente de tensões (de origem térmica ou retração)
f_{ct}	Resistência do betão à tração
f_{ck}	Valor característico da resistência do betão à compressão
f_{ctm}	Valor médio da resistência do betão à tração
f_c	Resistência do betão à compressão
f_{cm}	Resistência média à compressão do betão
h_{conv}	Coefficiente de convecção
h_{eq}	Coefficiente de transmissão de energia térmica equivalente
h_w	Coefficiente de convecção da água
η_i	Expoente para a propriedade X_i
$J(t, t')$	Função de fluência para o instante t , correspondente a carregamento à idade t'

$\phi(t, t')$	Coeficiente de fluência para o instante t , correspondente a carregamento à idade t'
K	Condutibilidade térmica do material
k	Condutibilidade térmica
$M(t, T)$	Maturidade para a idade t e história de temperaturas $T(\tau)$, $\tau \in [0, t]$
Ω	Grau de Refrigeração
ν	Coeficiente de Poisson; Velocidade do vento
$Q(t)$	Calor gerado até ao instante t
Q_{pot}	Calor potencial até à hidratação completa
q_c	Fluxo de calor
q'_x	Fluxo de calor através de uma superfície por unidade de área
q_x	Fluxo de calor
R	Constante universal dos gases perfeitos
ρ	Refletividade
ρc	Capacidade calorífica – calor específico volumétrico
p_z	Parâmetro genérico da parábola do arco à cota z
σ	Tensão no betão; Constante de Stefan-Boltzmann
$\sigma_{ct}(t)$	Tensão de tração no instante t
T	Temperatura
T_s	Temperatura da superfície
$T_{s,in}$	Temperatura de entrada da água na serpentina
$T_{s,out}$	Temperatura da saída da água na serpentina
T_{ref}	Temperatura de referência
t	Instante de tempo
t_{eq}	Idade equivalente à temperatura T_{ref}
τ	Transmissividade
w/c	Relação água/cimento (em peso)
$X_i(\alpha)$	Propriedade X para o grau de hidratação α
X_{i1}	Valor hipotético de X para $\alpha=1$
X_{28}	Valor hipotético de X para 28 dias
x, y, z	Coordenadas no sistema de eixos de referência

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Esta dissertação foi elaborada no âmbito do projeto final do curso de Engenharia Civil com especialização em Estruturas, sendo o objetivo principal da mesma elaborar estudos e avaliar a possível alteração de um processo construtivo, mais concretamente, o aumento da espessura das camadas de betonagem de dois metros para quatro metros.

O Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor foi escolhido como modelo para os nossos estudos. Este projeto, desenvolvido pela EDP, possui como espessura máxima das camadas de betonagem dois metros e um tempo de construção de aproximadamente quatro anos, tempo este que seria reduzido com a alteração indicada.

Procurou-se através de uma recolha bibliográfica abordar temas atuais e controversos, na medida em que a complexidade dos temas em causa leva a uma disparidade de soluções obtidas por diferentes autores. Importa referir, que todos os temas abordados e descritos ao longo desta dissertação, estão presentes na construção de uma estrutura de betão em massa como uma barragem.

1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Os temas atrás mencionados serão abordados ao longo de seis capítulos, sendo que o primeiro destina-se à introdução e o último à conclusão.

Tanto o capítulo dois como o capítulo três são teóricos. O segundo capítulo aborda o Modelo Térmico, definindo a formulação do calor gerado pelo processo de hidratação do cimento e respetivas formas de transmissão deste. Este capítulo descreve metodologias experimentais que permitem quantificar o calor libertado e ainda modos de diminuição da libertação deste mesmo calor e a influência da temperatura nas propriedades finais do betão.

O objetivo do terceiro capítulo é apresentar as características gerais do Modelo Mecânico, como a evolução das propriedades mecânicas do betão, fluência e retração. Neste capítulo, também são tratados os diferentes métodos de arrefecimento de uma estrutura de betão em massa, bem como um exemplo simples com serpentinas de refrigeração no programa de cálculo DIANA.

O capítulo quatro apresenta as características gerais do aproveitamento do Baixo Sabor, sobretudo da geometria do escalão de montante. O modelo tridimensional utilizado define apenas a zona mais espessa da barragem até uma altura de aproximadamente 40 metros. Durante este capítulo, é exposto o faseamento construtivo para dois modelos, sendo o primeiro o definido em projeto pela EDP com espessura máxima das camadas de betonagem de dois metros, e um segundo, definido com base no primeiro aumentando a espessura das camadas de betonagem para quatro metros.

No capítulo cinco são apresentados os resultados térmicos e mecânicos dos modelos, assim como a análise dos mesmos. Neste capítulo define-se também um novo modelo com condições mais favoráveis de refrigeração e temperatura de colocação, sendo assim, os resultados mais satisfatórios.

1.3. PROPÓSITO DA EXISTÊNCIA DE UMA BARRAGEM

A água é um bem essencial à vida humana, tendo desde sempre assumido um papel importantíssimo, na medida em que condiciona a forma de viver dos seres humanos. Desta forma, o Homem foi obrigado a criar estruturas capazes de se opor ao seu movimento natural e capazes de a redirecionar consoante as necessidades. As barragens surgiram com o objetivo de armazenar água devido à irregularidade dos rios, principalmente secas extensas. Contudo, nos dias que correm, a sua utilidade desenvolveu-se, podendo uma barragem ser usada para muitos outros fins, como por exemplo, abastecimento de água, irrigação, regularização do caudal e produção de energia elétrica.

Segundo a ICOLD, uma barragem deverá ser uma estrutura segura, económica e estável, enquadrando-se harmoniosamente no ambiente que a rodeia. Para tal, as barragens podem ser constituídas de diferentes materiais e possuir diferentes características. A classificação mais comum consiste na divisão destas, consoante o material usado para a sua construção em dois grandes grupos: barragens de aterro de terra ou de enrocamento e barragens de betão e alvenaria.

A escolha do tipo de barragem a utilizar depende das condições onde esta vai ser implantada, tais como, questões morfológicas, geológicas, hidrogeológicas, características geotécnicas da fundação, materiais existentes no local, probabilidades de cheias, da tecnologia disponível, e, obviamente, de questões económicas (Press, 1958).

Devido a questões topográficas, económicas e aos progressos tecnológicos, os engenheiros começaram a criar novas formas e sistemas estruturais capazes de sustentar a barragem, diminuindo as quantidades de betão, obtendo-se, assim, sistemas mais esbeltos e bem concebidos.

1.4. TIPOS DE BARRAGENS DE BETÃO

O primeiro tipo de barragens a ser construído foi as barragens de gravidade que resistem à pressão hidrostática através do seu peso, isto é, o impulso gerado pela água no paramento de montante da barragem é equilibrado através do seu peso próprio, transmitindo o esforço resultante diretamente à fundação. Este tipo de barragens origina estruturas muito pouco esbeltas, necessitando de grandes quantidades de betão, como se pode concluir através da figura 1.1.

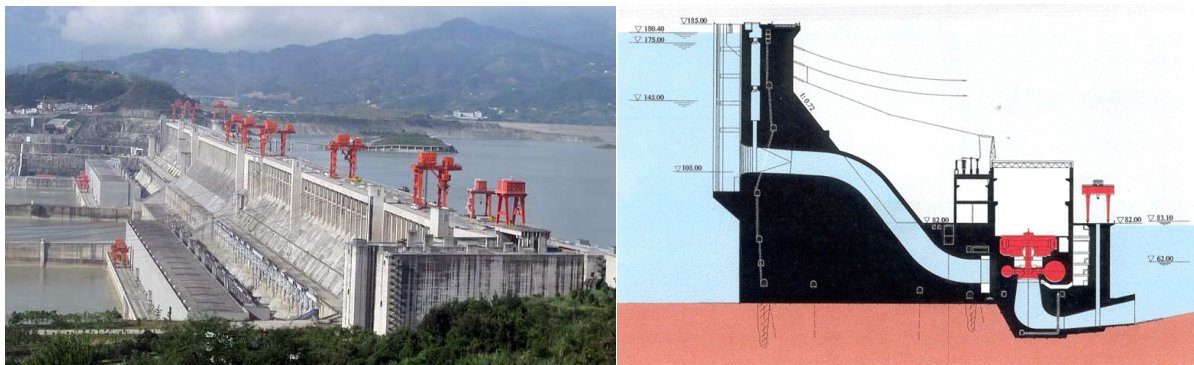


Fig.1.1 – Three Gorges Dam, China – Barragem de Gravidade (CNCLD, 2011)

Posteriormente, surgiram as barragens de contrafortes, sendo esta uma solução em que o carregamento é transmitido à fundação de forma regular, através dos contrafortes. Uma grande vantagem deste tipo de barragem consiste na facilidade com que este tipo de estrutura acomoda assentamentos diferenciais devido à sua flexibilidade e na redução da ação da subpressão devido à drenagem assegurada pelos espaços situados entre os contrafortes. A barragem de Pracana representada na figura 1.2 é um exemplo deste tipo de estruturas.



Fig.1.2 – Barragem de Pracana – Barragem de Contrafortes (CNPGB, INAG)

Por último, surgiram as barragens em arco, que se podem dividir em dois grupos: as barragens de arco-gravidade e as barragens abóbada. Esta distinção está fundamentalmente ligada à sua curvatura, sendo que o primeiro grupo apenas apresenta curvatura em planta, e o segundo apresenta dupla curvatura. Comparativamente com os outros tipos de barragem, as barragens de arco apresentam menor volume. A escolha deste tipo de barragem, como solução mais adequada, depende das características geotécnicas do maciço de fundação e da topografia do local e ainda das características climáticas e hidrológicas do local.

As barragens abóbada de dupla curvatura, quando comparadas com os casos anteriores, são estruturas muito esbeltas e económicas. Este tipo de barragem é utilizado quando a largura do vale é pequena em relação à sua altura e quando os encontros são constituídos por rocha de boa qualidade. A sua forma, que se pretende que aproxime a do anti-funicular do carregamento tanto do peso próprio como da pressão hidrostática, desempenha um papel fundamental, garantindo a sua segurança estrutural. A curvatura horizontal da abóbada é responsável pela centralização da linha de pressões das secções horizontais. Por outro lado, a curvatura vertical tem a finalidade de descentrar a linha de pressões para a ação do peso próprio, obtendo assim, compressões verticais em toda a barragem quando se combina as ações do peso próprio e da pressão hidrostática. Este ajuste do peso da estrutura é necessário, visto que, existe uma tendência para a geração de trações verticais junto da base da barragem na face montante e no terço superior da barragem, na face jusante.

A figura 1.3 representa a Barragem de Kolnbrein, na Áustria, sendo esta uma barragem abóbada de dupla curvatura.



Fig.1.3 – Kölnbrein Dam, Áustria – Barragem Abóbada de Dupla Curvatura (ANCLD, 2011)

1.5. DEFINIÇÃO DA FORMA

As barragens abóbada são construídas, geralmente, em betão, estando a sua curvatura voltada para jusante. Um arco é uma forma bastante adequada para resistir ao esforço devido às pressões hidrostáticas, explorando a resistência à compressão do betão.

1.5.1. ARCOS CIRCULARES DE RAIOS CONSTANTES

Uma forma bastante comum de abóbadas com curvatura horizontal verifica-se no caso dos arcos circulares de raio constante. Com isto, a barragem adquire forma aproximadamente cilíndrica, sendo o paramento de montante vertical, com um raio de curvatura constante e o paramento de jusante inclinado.

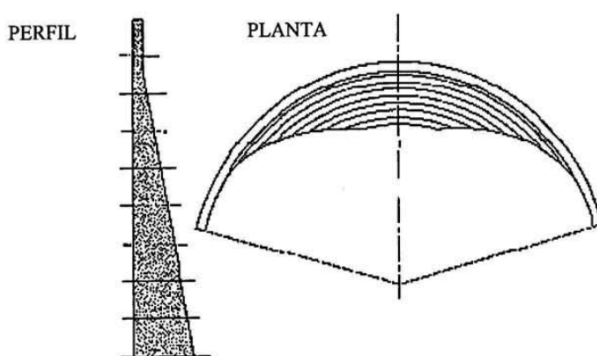


Fig.1.4 – Corte e Planta de uma Barragem definida através de arcos circulares de raio constante (Batista, 1998)

1.5.2. ARCOS CIRCULARES DE ÂNGULO CONSTANTE

Uma geometria mais elaborada que a do caso anterior ocorre quando se pretende manter constante o ângulo ao centro dos arcos, tentando aproveitar o mais possível o efeito de arco desde o coroamento à base. O comprimento do raio diminui desde o coroamento até à fundação, proporcionalmente ao estreitamento do vale. É de salientar que o ângulo que otimiza esta solução é de 120° , devendo valores superiores a este ser desprezados, visto que com esses valores as zonas dos encontros fazem com os

arcos ângulos muito oblíquos, sendo elevada a componente tangencial do impulso nas nascentes relativamente à orientação dos encontros.

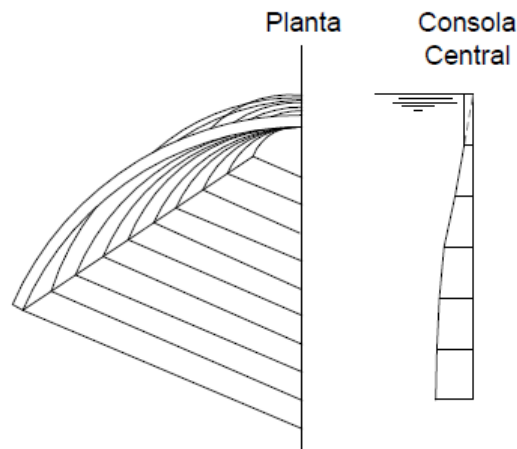


Fig.1.5 – Corte e Planta de uma Barragem definida através de arcos circulares de ângulo constante (Meliço, 2010)

1.5.3. ARCOS DE RAIO E ÂNGULO VARIÁVEIS

Esta geometria foi criada com o objetivo de solucionar inconvenientes dos outros dois, de raio constante e de ângulo constante. No primeiro caso, o grande volume de betão necessário e, no segundo caso, a inclinação exagerada e possível perda de equilíbrio, quando a albufera está vazia.

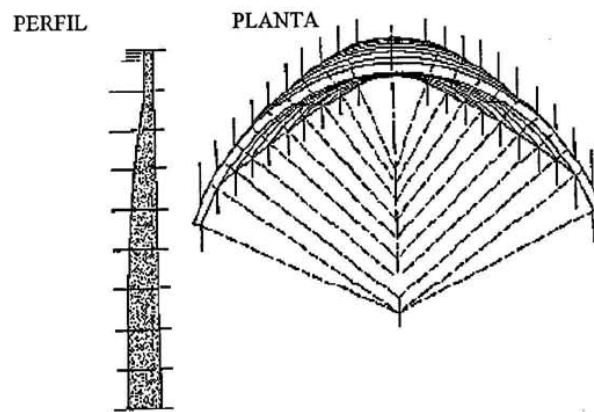


Fig.1.6 – Corte e Planta de uma Barragem definida através de arcos de raio e ângulo variáveis (Batista, 1998)

1.6. FATORES QUE CONDICIONAM A FORMA DE UMA BARRAGEM ABÓBADA

1.6.1. FUNDAÇÃO

Devido à existência de uma albufeira, a dimensão da área de contacto entre a barragem e fundação e a intensidade das tensões transmitidas desta área tornam relevantes os aspetos seguintes:

Primeiro, a fundação deve possuir resistência suficiente para resistir aos esforços transmitidos pela barragem. Segundo, a fundação sofre deformações devido à grande quantidade de água presente na albufeira, que pode ter repercussões na barragem. Terceiro, a fundação é um meio heterogéneo, sendo que esta particularidade pode causar tensões localizadas. Por último, a espessura reduzida da abóbada gera gradientes hidráulicos significativos, podendo causar erosões que coloquem em risco a segurança da barragem (Miranda, 2012).

Geralmente a fundação da barragem é executada abaixo do nível natural do terreno, sendo necessário proceder à remoção da rocha superficial de menor qualidade, escavando-a por processos mecânicos ou através do auxílio de explosivos.

O maciço resultante deverá possuir as características mecânicas e hidráulicas adequadas às solicitações que sobre ele vão ser exercidas. Existem ainda tratamentos para melhorar a fundação no caso de esta apresentar fendas e/ou fissuras, sendo habitual proceder-se à injeção dos vazios existentes com caldas de cimento. Com esta injeção garantimos um aumento da impermeabilidade da fundação e a sua homogeneização mecânica.

1.6.2. CHEIAS

Os estudos hidrológicos devem permitir definir as afluências e, a partir destas, os estudos económicos devem permitir que se definam os caudais que devem ser explorados e os que devem ser descarregados e a folga necessária para o encaixe de cheias. Deste modo, a dimensão dos órgãos de descarga e a cota do coroamento ficam estabelecidos.

1.6.3. EFEITOS CLIMÁTICOS

Os efeitos climáticos têm que ser tidos em consideração no dimensionamento e construção das barragens.

No caso das barragens de betão, os esforços gerados pela temperatura são dos mais relevantes no seu dimensionamento. As ações térmicas a considerar são as que decorrem da libertação do calor de hidratação e as ações térmicas ambientais, em especial as que correspondem à variação anual da temperatura média do ar.

Pode-se, desta forma, concluir que tanto o programa de construção como os processos construtivos devem ser adequados às condições climatéricas, visto que, estas condicionam os tempos de construção.

Quando se projeta uma barragem abóbada com o objetivo de minorar o efeito da retração do betão, é usual a colocação de juntas de contração, habitualmente verticais (Genésio 1993).

As juntas de contração são definidas por planos verticais radiais à superfície de referência, sendo providas de caixotões. Com a finalidade de garantir o monolitismo e impermeabilidade da estrutura, as juntas são posteriormente preenchidas com calda de cimento, sendo o processo mais comum a injeção desta calda.

Uma vez que as juntas são pontos de menor resistência da estrutura devemos procurar minorar o seu número. Contudo, não pode ser esquecido que o papel das juntas é imprescindível na segurança estrutural de uma barragem, pois permitem a libertação de tensões facilitando a resposta da estrutura a variações de temperatura e assentamentos da fundação (Genésio 1993).

1.6.4. SIMETRIA

Apesar de não ser necessário, é recomendável, adotar-se um perfil simétrico ou aproximadamente simétrico, na medida em que esta característica afeta a distribuição de esforços na barragem. Uma barragem não simétrica tem um comportamento mais complexo quer para as ações estáticas quer, principalmente, para ações dinâmicas. Para assegurarmos a simetria é habitual proceder-se ao aumento da profundidade de escavação em certas partes da fundação, à construção de encontros artificiais e à orientação e localização mais adequadas da barragem.

1.6.5 REGULAMENTO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

O regulamento de segurança de barragens é complementado, com vista à sua boa execução, com normas relativas ao projeto, à construção, à exploração e à observação e inspeção de barragens. Como tal, as normas de projeto de barragens estabelecem princípios e critérios gerais, numa perspetiva de garantir a segurança das obras com o máximo de economia.

A experiência tem evidenciado algumas recomendações gerais quanto às características de barragens abóbada, do betão que as constitui e da fundação que as suporta, das quais se destacam:

- Evitar formas angulosas e reentrâncias acentuadas, descontinuidades e heterogeneidades, utilizando armaduras nestas zonas quando não evitáveis, assim como na vizinhança de aberturas;
- Utilizar, sempre que possível, estruturas curvas, quer em planta quer na vertical;
- Evitar coroamento excessivamente rígidos;
- Considerar arcos com curvatura decrescente para as margens e espessuras constantes ou aumentando para as nascenças e, sempre que possível, estruturas simétricas, com socos e, se necessário, com encontros artificiais;
- Criteriosa escolha do local, adequada implantação da obra e cuidada preparação da superfície de fundação;
- Realização de trabalhos de consolidação na fundação e de dispositivos de impermeabilização e de drenagem;
- Estudo do betão e uso de técnicas adequadas para o seu fabrico, transporte e colocação;
- Utilização de betão de pequena permeabilidade, de armaduras de pele a montante e de sistemas de drenagem no interior.

2

Problema Térmico

2.1 INTRODUÇÃO

O calor provém de diferentes fontes de energia e a sua transmissão assenta nas leis e princípios básicos da Termodinâmica (Welty, 1978). A transmissão do calor entre dois elementos verifica-se sempre que exista uma diferença de temperaturas entre os mesmos, procurando-se repor o equilíbrio térmico, transmitindo-se calor do elemento com temperatura mais elevada para o elemento com temperatura mais baixa, com conservação de energia. (Teles, 1985).

Caso um elemento não se encontre em condições adiabáticas, nas quais não ocorrem transferências de calor, admitem-se, habitualmente, três mecanismos de transmissão de calor: a condução, a convecção e a radiação.

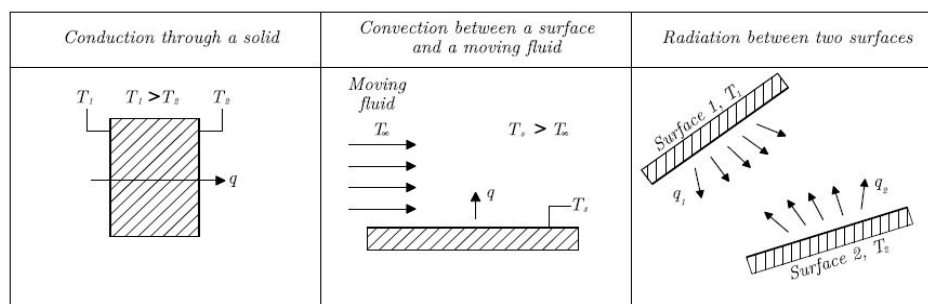


Fig.2.1 – Processos Transmissão de Calor (Azenha, 2009)

2.2 PROCESSOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

2.2.1. CONDUÇÃO

A condução de calor consiste na troca de energia térmica entre sistemas em contacto ou parte de um mesmo sistema a diferentes temperaturas. Esta transmissão de energia ocorre pela interação molecular (impacto) onde moléculas de maior nível energético transferem energia às de inferior nível energético. Para sólidos não metálicos, o mecanismo de condução está associado ao movimento aleatório das moléculas que o constituem. No caso dos sólidos metálicos deve-se aos eletrões livres. A direção do fluxo dá-se sempre no sentido das temperaturas decrescentes.

A lei fundamental que rege a transmissão de calor por condução, enunciada por Biot, é conhecida por Lei de Fourier por ter sido utilizada como equação fundamental na sua “Teoria Analítica do Calor”.

Tomemos como exemplo uma placa de material sólido, homogéneo e isotrópico, isto é, um material que possui as mesmas propriedades físicas independentemente do ponto e da direção considerada. A

placa é limitada por duas superfícies planas e paralelas, a diferentes temperaturas, possuindo dimensões tais que comparando com a espessura, essas superfícies podem ser consideradas de dimensões infinitas. (Teles, 1985)

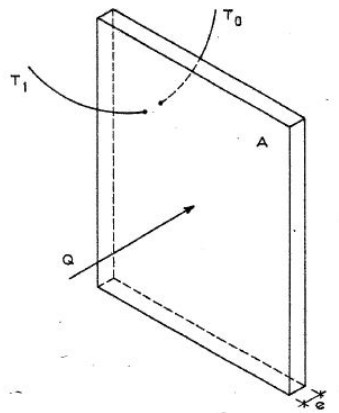


Fig.2.2 – Experiência Fundamental (Teles, 1985)

Seja T_0 a temperatura da superfície que está à temperatura mais baixa e T_1 a temperatura da outra superfície (mais elevada) e e a espessura da placa. Pode-se concluir que após ser atingido o estado permanente, a quantidade de calor Q que atravessa a placa no intervalo de tempo t através da superfície A é igual a:

$$Q = \frac{K \cdot (T_1 - T_0) \cdot A \cdot t}{e}$$

(Equação 2.1)

Na expressão anterior, K corresponde a uma constante denominada de condutibilidade térmica do material [$J/(K.m.s)$], que quantifica a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente à superfície na unidade de tempo e para um gradiente térmico unitário. Esta constante é condicionada pela composição química, estado físico, textura, temperatura, pressão e pela organização da malha atômica do material, que depende da interação entre os átomos constituintes. Os materiais cristalinos, com uma malha atômica bem ordenada, possuem valores de K superiores aos dos outros materiais (Incropera e DeWitt 2001).

Devido à dificuldade associada à quantificação desta constante, a sua gama de valores é muito vasta e varia de autor para autor. Pensa-se que a condutibilidade térmica varia de acordo com a natureza dos agregados, da fração de volume dos agregados no betão e do estado da humidade do betão (Kim et al e Breugel, 1998).

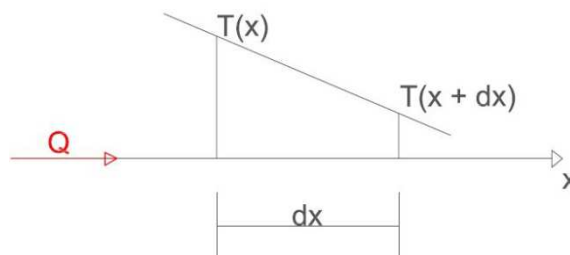


Fig.2.3 – Linhas Isotérmicas

Pontos situados sobre uma linha ou superfície normal à direção do fluxo têm a mesma temperatura, denominam-se tais linhas ou superfícies de isotérmicas.

A equação 2.1 pode representar-se na forma expressa na equação 2.2, sendo q o fluxo calorífico que atravessa a secção, K novamente a condutibilidade térmica, T a temperatura e x a coordenada espacial.

$$q = \frac{dQ}{dt} = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

(Equação 2.2)

Pode-se concluir que a quantidade de calor que passa através de uma área A , colocada normalmente à direção do fluxo calorífico, na unidade de tempo, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico. Contudo, muitos estudos demonstram que em materiais porosos como o betão, parte desta libertação é feita através do transporte de humidade (Bazant 1982).

Esta equação assume, desta forma, mais uma parcela correspondente ao Efeito Dufour, no qual o fluxo é afetado pelo gradiente de concentração, o qual representa o valor da concentração de determinada substância ao longo do espaço. Contudo, esta parcela irá ser desprezada na medida em que, segundo estudos efetuados por Bazant e Thonguthai, 1978, este efeito no caso do betão, a temperatura ambiente, não representa um papel preponderante na transmissão de calor.

Deve também definir-se algumas das propriedades dos materiais, importantes na caracterização da condução do calor, usada em muitas das formulações possíveis.

O calor específico c representa a quantidade necessária de calor para elevar de uma unidade de temperatura um corpo de massa unitária. Este exprime-se em $J / (Kg \cdot K)$. Geralmente esta constante surge acoplada a outra, ρ , que representa a massa específica do material, originando uma nova constante designada de calor específico volumétrico, ρc , que representa a capacidade do material para armazenar energia, exprime-se em $J / (m^3 \cdot K)$.

Pode ainda definir-se uma característica do material, também relacionada com a condutibilidade térmica deste, à qual Kelvin deu o nome de difusibilidade e Maxwell de condutibilidade termométrica. Esta constante representa a capacidade que um material possui de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de a armazenar. Por outras palavras, representa a velocidade com que um determinado material, reponde a uma variação térmica na sua envolvente. Esta constante tem como unidade m^2/s .

$$h^2 = \frac{K}{\rho c}$$

(Equação 2.3)

Para se definir um campo de temperaturas variável no tempo que inclua o efeito do calor libertado pela hidratação do cimento, é necessário definir o balanço energético que representa o fenómeno de transferência do fluxo de calor. Utilizando como base um elemento cúbico de volume representativo, na presença de um gradiente térmico, a condução de calor ocorre através de fluxos perpendiculares às faces, respetivamente qx , qy e qz .

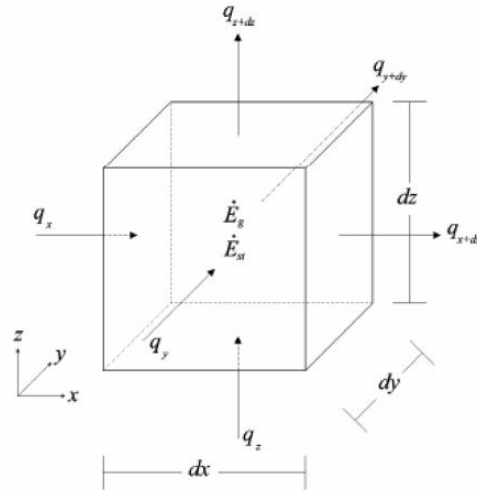


Fig.2.4 – Fluxo de Calor num Volume Infinitesimal (Azenha, 2009)

Devido ao gradiente térmico podemos considerar que o fluxo calorífico é representado pela seguinte expressão, podendo x na equação ser substituído por y ou z, consoante a direção pretendida.

$$q_{x+\partial x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \partial x$$

(Equação 2.4)

Considerando um sistema fechado, pela Primeira Lei da Termodinâmica, podemos afirmar:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}$$

(Equação 2.5)

$$\dot{E}_g = \dot{Q} \partial x \partial y \partial z$$

(Equação 2.6)

$$\dot{E}_{st} = \rho c \dot{T} \partial x \partial y \partial z$$

(Equação 2.7)

\dot{E}_{in} – Representa a energia que entra no sistema na unidade de tempo (W)

\dot{E}_{out} – Representa a energia que sai no sistema na unidade de tempo (W)

\dot{E}_{st} – Representa o armazenamento de energia na unidade de tempo (W)

\dot{E}_g – Representa a geração de energia na unidade de tempo (W)

\dot{Q} – Representa a geração de calor, devida à hidratação do cimento na unidade de tempo ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)

Admitindo os fluxos energéticos representados na figura 7 e substituindo as equações 2.4, 2.6 e 2.7 em 2.5, obtemos a seguinte equação:

$$q_x + q_y + q_z + \dot{Q} \partial x \partial y \partial z - q_{x+\partial x} - q_{y+\partial y} - q_{z+\partial z} = \rho c \dot{T} \partial x \partial y \partial z$$

(Equação 2.8)

A transferência de calor através das superfícies pode ser expressa a partir de:

$$q_x = -K \partial y \partial z \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -K \partial x \partial z \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -K \partial x \partial y \frac{\partial T}{\partial z}$$

(Equação 2.9)

(Equação 2.10)

(Equação 2.11)

Obtém-se assim, a seguinte expressão representativa da condução do calor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \dot{T}$$

(Equação 2.12)

Nos casos em que o coeficiente de condutibilidade térmica é constante nas diferentes direções num determinado intervalo de tempo, a expressão anterior assume a seguinte forma:

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = \rho c \dot{T}$$

(Equação 2.13)

Sendo que os três primeiros termos da equação representam o calor que entra no elemento, o 4º termo caracteriza o calor gerado e o termo do lado direito da equação corresponde ao aumento de temperatura devido à transferência de calor.

2.2.2. CONVECÇÃO

A convecção é um mecanismo de transferência de calor, que se dá quando se verifica um diferencial de temperatura entre uma superfície de um sólido e um fluido em movimento. (Silveira 1961). Este processo pode ocorrer de duas formas, nomeadamente, através de convecção livre ou da convecção forçada.

Na convecção livre a troca de calor ocorre devido à diferença de temperaturas entre a massa total de ar e o ar mais próximo do sólido, sendo a temperatura deste afetada devido ao seu contacto com o sólido. Como as temperaturas são diferentes as densidades do ar também são, promovendo um movimento natural do ar, entrando em contacto com o sólido nova massa de ar, alterando a sua temperatura. Gera-se assim, um ciclo que termina quando se atinge o equilíbrio térmico entre a massa de ar e o betão (Azenha 2004).

Por outro lado, a convecção forçada é um mecanismo de transferência de calor no qual o movimento do fluido é gerado por uma fonte externa. Este facto, provoca um aumento da velocidade de renovação do ar próximo do sólido, intensificando, assim, o processo de convecção livre. A convecção forçada pode ser de dois tipos, consoante o movimento do fluido, ou laminar, sendo o seu estudo efetuado por via analítica ou turbulento, tratado por métodos empíricos (Silveira 1961).

A convecção é traduzida numericamente através da Lei de Newton, tanto para a convecção livre como a forçada, uma vez que o mecanismo de transferência de calor é praticamente o mesmo. Através da Lei de Newton podemos concluir que a taxa de calor que um corpo ganha ou perde é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e as suas fronteiras.

$$q_c = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad \text{(Equação 2.14)}$$

Na equação q_c é o fluxo calorífico na superfície do elemento [Wm^{-2}] e h_c corresponde ao coeficiente de condutância térmica superficial [$Wm^{-2}K^{-1}$]. É usual considerar o h_c constante, uma vez que os erros cometidos não são significantes. Esta constante pode ser determinada por via analítica, através de uma análise dimensional ou recorrendo a expressões empíricas (Silveira 1961). Os termos T_s e T_f correspondem, respetivamente, à temperatura da superfície do betão e temperatura das fronteiras [K].

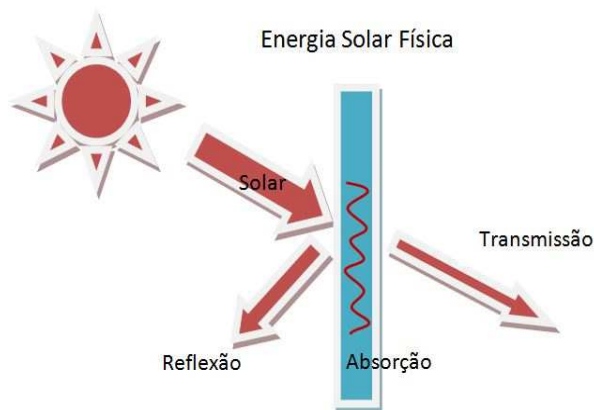
Silveira refere ainda a existência de uma camada, denominada de camada aderente, de espessura de apenas alguns milímetros. Esta camada é constituída pelo fluido que se mantém praticamente aderente à superfície, funcionando como um isolante térmico. Esta camada deve-se a tensões tangenciais provocadas pela viscosidade do fluido. Considera-se na teoria que esta camada está em repouso, contudo esta encontra-se em regime laminar.

A espessura desta camada depende da viscosidade, densidade e velocidade do fluido e da rugosidade e forma da superfície.

É importante referir também a existência de uma camada de passagem que existe em todos os casos de convecção. Para a determinação da sua espessura, admite-se que nesta camada a transferência de calor se dá através de condução pura (Eckert e Drake 1972).

2.2.3. RADIAÇÃO

Ao contrário da condução e da convecção, a radiação é a única forma de transmissão que não precisa de um meio para ocorrer transferência de calor. A radiação é a transmissão de energia térmica, emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas, através de fótons discretos, que se propagam à velocidade da luz. Pode-se concluir então que esta transmissão provoca uma agitação térmica das moléculas suas constituintes, sendo que qualquer corpo com temperatura superior a $0^\circ K$ emite ondas eletromagnéticas, geralmente no campo do infravermelho, levando consigo parte da energia térmica.



Contudo, cada corpo comporta-se de maneira diferente, na medida em que, quando recebe ondas eletromagnéticas provenientes de outros corpos, parte desta energia é transmitida, parte é refletida e parte é absorvida. A forma como estas parcelas se distribuem, depende da natureza do corpo, da sua temperatura, da extensão e estado da sua superfície e do ângulo de incidência da radiação (Teles 1985).

Fig.2.5 – Transmissão de calor por radiação

$$a + r + t_r = 1$$

(Equação 2.15)

a – Coeficiente de absorção do corpo

r – Coeficiente de reflexão do corpo

t_r – Coeficiente de transmissão do corpo

Através da equação anterior pode-se concluir que um corpo com coeficiente de absorção igual a zero ($a = 0$) difunde totalmente as radiações incidentes, sendo denominado de corpo branco. Pelo contrário, um corpo com $a = 1$, absorve toda a radiação e é chamado de corpo negro. Por outro lado, a um corpo com coeficiente de reflexão igual a um ($r = 1$), que reflete toda a radiação incidente, chamamos de refletor perfeito, sendo o seu oposto $r = 0$ denominado de corpo opaco. Por último, a um corpo com coeficiente de transmissão igual a um ($t_r = 1$), que transmite toda a radiação incidente, chamamos de corpo transparente, sendo o seu contrário $t_r = 0$, um corpo opaco.

Convém salientar que a energia total emitida por um corpo a uma dada temperatura se reparte pelos diversos comprimentos de onda das radiações simples, não sendo essa repartição uniforme (Welty, 1978).

Seguidamente, serão descritas algumas definições importantes para a compreensão do fenómeno da radiação. Em primeiro lugar, a radiância ou poder emissivo total, E , é um fluxo de energia definido pela quantidade de energia radiante emitida por um corpo em todas as direções, por unidade de tempo e por unidade de superfície. Por outro lado, designa-se por radiância monocromática ou poder emissivo espectral, E_λ , o fluxo de energia radiante emitido por um corpo a uma dada temperatura e para um determinado comprimento de onda. Por último, a irradiância, I , é a quantidade de energia radiante que incide na superfície de um corpo por unidade de tempo e por unidade de área.

Apesar de existirem diversas leis de transferências de calor, nesta dissertação apenas a Lei de Stefan-Boltzmann será mais desenvolvida, na medida em que o estudo exaustivo das diferentes leis não se enquadra no pretendido neste trabalho.

Contudo, deve referir-se os princípios básicos das restantes leis (Teles 1985), das quais se destacam a Lei de Lambert, válida para corpos negros, que estabelece que os fluxos emitidos por um corpo em várias direções são proporcionais aos cossenos dos ângulos de emissão.

A Lei de Plank, baseia-se no facto descrito anteriormente de que a energia total emitida por um corpo não se distribui uniformemente pelo espectro de frequência. Plank estabeleceu, desta forma, na sua Teoria Quântica, para um corpo negro, a relação entre a radiância monocromática, E_λ , e o comprimento de onda λ . Mais tarde, Wien conclui que à medida que a temperatura absoluta sobe, a radiância monocromática máxima ocorre para comprimentos de onda cada vez mais baixos.

A lei de Stefan – Boltzmann estabelece que a radiância E de um corpo negro, $\varepsilon = 1$, é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta, como se observa na seguinte expressão.

$$E = \varepsilon \cdot c \cdot \sigma \cdot T^4$$

(Equação 2.16)

Nesta expressão σ representa um coeficiente de proporcionalidade [$1.364 \times 10^{-12} \text{ cal s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$], ε define a emissividade de um corpo comparativamente a um corpo negro, esta constante varia entre 1 para corpos negros, como visto acima, e valores menores do que 1 para corpos cinzentos.

Na realidade, a radiância de um corpo negro não depende unicamente da temperatura absoluta do corpo em questão, depende também da temperatura absoluta dos corpos vizinhos, ou seja, o fluxo passa a ser caracterizado pela diferença entre o fluxo emitido pelo corpo, por unidade de área, e o fluxo emitido pelos corpos na vizinhança, isto é, fluxo absorvido.

2.3 CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

2.3.1. GERAÇÃO DE CALOR

A hidratação do cimento é uma reação fortemente exotérmica. Desta forma, é importante conseguir prever o calor libertado pelo cimento durante este processo, com vista a definir campos de temperaturas e garantir a segurança estrutural devido ao risco de fissuração prematura. Sabe-se também que esta reação é termicamente ativada, ou seja, a taxa de geração de produtos de reação aumenta com o aumento da temperatura. Devemos, assim, procurar criar um modelo numérico capaz de reproduzir a geração de calor do betão tendo em conta estas duas características, sendo que a primeira formulação proposta por Reinhardt *et al* (1982) ainda é a mais utilizada hoje em dia (Azenha 2009).

Segundo Reinhardt o calor de hidratação pode ser formulado matematicamente através do produto de duas funções independentes, a primeira descrevendo o grau de geração de calor $f(\alpha)$ e a segunda, reproduzindo o efeito da temperatura $g(T)$. Desta forma, obtém-se o termo \dot{Q} , que exprime a taxa de geração de energia por unidade de volume, que traduz a geração interna de calor no betão aquando da hidratação do cimento.

$$\dot{Q} = f(\alpha) \cdot g(T)$$

(Equação 2.17)

Na figura seguinte podemos ver um gráfico que representa a evolução da taxa calor gerado para diferentes temperaturas de cura, expressa em W por Kg de cimento. Integrando esta curva ao longo dos sucessivos instantes em que é produzida uma determinada taxa de calor, obtém-se um gráfico que representa o calor gerado acumulado.

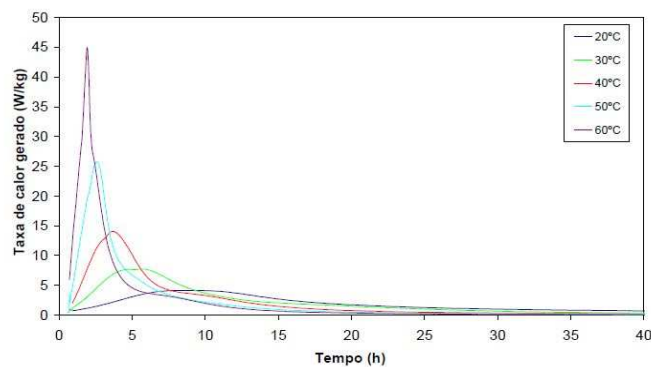


Fig.2.6 – Taxa de Geração de Calor para o CEM I 52.5R (Silva, 2007)

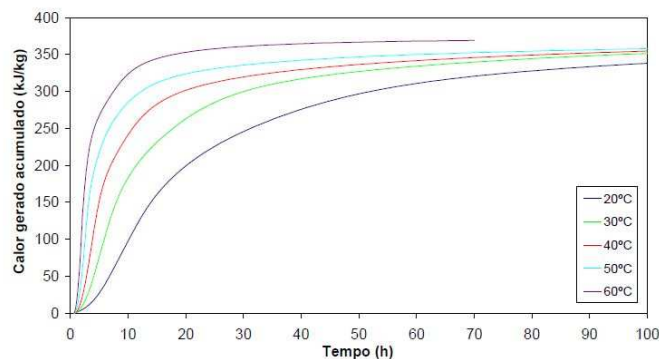


Fig.2.7 – Calor Gerado Acumulado para o CEM I 52.5R (Silva, 2007)

Pode concluir-se que as curvas assumem valores bastante diferentes consoante a temperatura a que é realizada a cura, isto é, para temperaturas mais elevadas o pico de geração de calor dá-se mais cedo e com um valor mais significativo. Surgiu, desta forma, a necessidade de criar uma função que não dependesse da temperatura, ou seja, aproximasse as três curvas, formando apenas uma.

Antes de mais, é necessário definir um parâmetro bastante importante no processo de geração de calor, denominado de grau de hidratação, α , que pode ser estimado de diversos modos, nomeadamente, através do quociente entre a quantidade de cimento que reagiu até um determinado instante e a quantidade total de cimento anidro no início da hidratação, através da evolução das propriedades mecânicas do betão e ainda através do quociente entre o calor gerado acumulado até um determinado instante, $Q(t)$, e o calor total que irá ser gerado Q_{Total} . Este Q_{Total} , também denominado de calor potencial, representa o calor que seria gerado caso se atingisse a hidratação completa de todo o cimento. Esta hidratação completa do betão raramente é atingida, visto que, a crescente densificação da malha estrutural do cimento hidratado desacelera a reação, não permitindo que a água presente em zonas já hidratadas atinja zonas ainda por hidratar.

$$\alpha = \frac{Q(t)}{Q_{Total}}$$

(Equação 2.18)

Como facilmente se constata, este parâmetro varia entre 0 e 1, sendo que 0 corresponde ao início da reação que, quando criamos um gráfico com abcissa, α , e ordenada \dot{Q} , taxa de geração de calor, obtemos um gráfico que já aproxima mais, em termos de forma, as três curvas, respetivamente 40°, 30° e 20° de temperatura de cura, como se constata na figura seguinte.

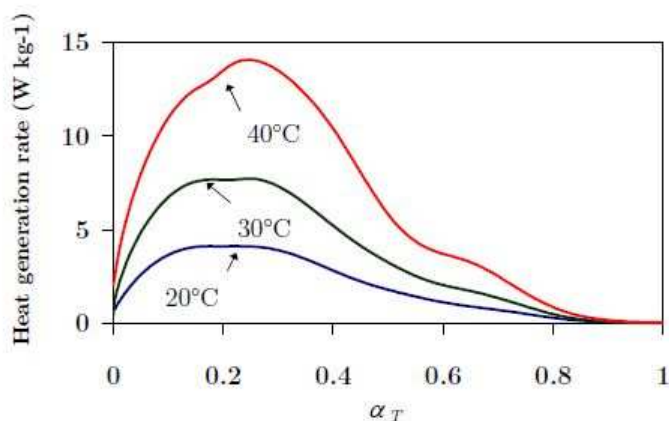


Fig.2.8 – Taxa de Geração de Calor em função do Grau de Geração de calor (Azenha, 2009)

Contudo, como já se referiu anteriormente, é necessário criar um gráfico que não dependa da temperatura. Para tal, criou-se um gráfico de taxa de geração de calor normalizada, obtido a partir da divisão da taxa de geração de calor, \dot{Q} , pelo máximo da taxa de calor, \dot{Q}_{pico} .

O gráfico passou a variar entre 0 e 1 tanto em abcissas como em ordenadas, aproximando as três curvas a uma, experimentalmente obtida para os diferentes tipos de cimento, como se consegue observar na figura seguinte.

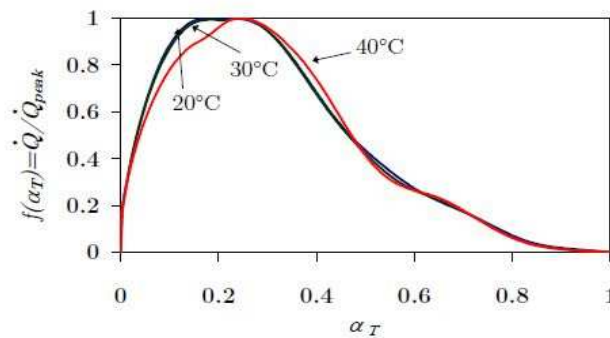


Fig.2.9 – Taxa de Geração de Calor Normalizada (Azenha, 2009)

Após obtermos a função $f(\alpha)$, que representa a primeira das duas formulações tidas como necessárias por Reinhardt, é necessário definir a função $g(T)$ que representa o efeito da temperatura na velocidade de reação. A lei que melhor traduz esta dependência é a Lei de Arrhenius, que explica o facto de as moléculas necessitarem de um estado de energia mínimo para que os reagentes se transformem em produtos de reação. Para tal, surge um conceito nesta equação denominado de energia de ativação, E_a , que representa a sensibilidade da mistura de betão à temperatura, ou seja, quanto maior este valor mais sensível será a reação de hidratação a uma variação de temperatura (Azenha 2009).

$$g(T) = a \cdot e^{-\frac{E_a}{R.T}}$$

(Equação 2.19)

Nesta equação, a , é uma constante de proporcionalidade [$1/s$], R , a constante universal dos gases perfeitos [$8.314 \text{ J/molK}^{-1}$] e E_a a energia de ativação aparente [J/mol]. Denominou-se esta energia de aparente porque esta formulação exponencial foi deduzida empiricamente para um gás ou líquido homogéneo de apenas uma fase, a partir do estudo da sua reatividade, termodinâmica e mecânica, o que não é claramente o caso da reação de hidratação do cimento. Nesta reação um conjunto de reações químicas diferentes ocorre ao mesmo tempo, influenciando-se umas às outras.

Finalmente, a partir do enunciado anteriormente, conclui-se que a taxa de geração de calor pode ser formulada, utilizando a seguinte expressão.

$$\dot{Q} = f(\alpha) \cdot a \cdot e^{-\frac{E_a}{R.T}}$$

(Equação 2.20)

A obtenção de todos os parâmetros necessários para a formulação da equação 2.20 é efetuada através de medições experimentais, utilizando calorímetros de diferentes tipos, sendo eles, adiabáticos, semi-adiabáticos ou isotérmicos. Estes aparelhos permitem registar a evolução da temperatura durante a hidratação em condições definidas. Pode, desta forma, caracterizar-se a reatividade do cimento e o potencial de geração de calor.

2.3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.3.2.1. Calorimetria Adiabática

Com este ensaio é possível medir a evolução das temperaturas numa amostra, no nosso caso, betão ou pasta de cimento geralmente até 10 Kg em condições adiabáticas, isto é, sem trocas de calor entre a amostra e o exterior, ou muito próximas destas, com perdas inferiores a 0.02 K/h.

O resultado obtido nesta experiência é denominado de curva adiabática, representado na figura seguinte.

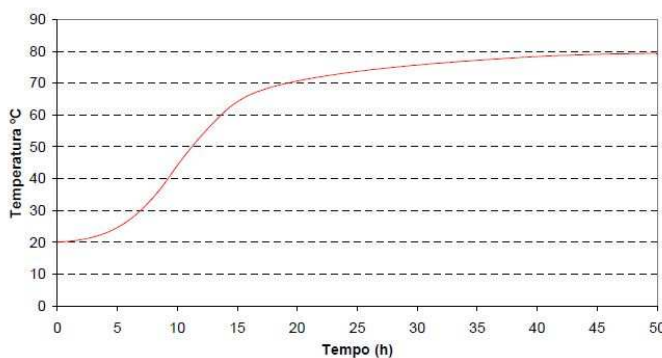


Fig.2.10 – Curva Adiabática

Como a grandeza pretendida é a geração de calor e não a variação da temperatura, é necessário converter uma grandeza na outra, partindo do pressuposto que, tanto a condutibilidade térmica como o peso específico da amostra se mantêm constantes durante a hidratação, como se admite na seguinte expressão:

$$Q(t) = \frac{\Delta T \cdot \rho \cdot c}{C}$$

(Equação 2.21)

Nesta expressão $Q(t)$ representa o calor gerado [J/Kg], ρc a capacidade calorífica do betão [J/(m³K)], ΔT a variação de temperatura entre o instante inicial e o instante t e, por último, C define a quantidade de cimento no betão [Kg/m³].

2.3.2.2. Calorimetria Semi-adiabática

O ensaio semi-adiabático baseia-se nos mesmos princípios que o ensaio adiabático, contudo, as exigências em termos de isolamento térmico são inferiores. Durante este ensaio as perdas de calor são medidas para que no final seja efetuada uma compensação na quantificação do calor gerado. Para esta compensação utiliza-se uma Lei de Arrhenius, pois as perdas de calor para o exterior não são constantes durante o ensaio e também pelo facto de a reação ser termicamente ativada. A expressão seguinte representa a formulação da geração de calor para este tipo de calorimetria.

$$Q(t) = \frac{\Delta T \cdot \rho \cdot c + \int_0^t \Delta P \cdot dt}{C}$$

(Equação 2.22)

Em que ΔP representa o calor dissipado durante o ensaio [W/m³]. Este ensaio é menos trabalhoso e dispendioso que o anterior. Contudo, devido às compensações numéricas, é menos rigoroso.

2.3.2.3. Calorimetria Isotérmica

Este ensaio consiste na medição de calor gerado numa amostra de pasta de cimento que é mantida em condições de temperatura constantes ao longo de todo o processo de hidratação. Com o objetivo de que estas condições sejam mantidas, este ensaio apenas pode utilizar como amostras pequenas quantidades de pasta de cimento, na medida em que, quantidades superiores originariam gradientes térmicos. O calor é transferido para o exterior por condução, sendo este medido com recurso a sensores de fluxo de calor. Este ensaio permite ainda a obtenção direta da energia aparente de ativação, parâmetro da Lei de Arrhenius, sendo que noutros ensaios, como o semi-adiabático, esta teria que ser estimada, gerando mais erros.

$$Q(t) = \frac{\int_0^t \Delta P \cdot dt}{C}$$

(Equação 2.23)

É importante referir que nesta medição a grandeza pretendida é diretamente obtida, pelo que não estamos sujeitos a erros de transformação numérica, como é o caso do ensaio adiabático. Por fim, estes calorímetros são mais sensíveis e estáveis do que os utilizados nos ensaios anteriores e necessitam de menor calibração.

2.3.3. REDUÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO

Tendo como objetivo principal a redução do calor de hidratação, é necessário garantir que a dosagem de cimento seja mínima, compatível com a resistência pretendida. Para tal, é comum a substituição de parte do cimento da mistura por outros materiais cimentícios, sendo frequentemente utilizadas as escórias de alto-forno e as cinzas volantes.

No enquadramento desta tese e visto o nosso betão apenas utilizar cinzas volantes, apenas estas serão especificadas mais detalhadamente. As cinzas volantes são materiais pozzolânicos que são subprodutos industriais obtidos por captação das poeiras dos gases de combustão das fornalhas alimentadas com carvão pulverizado (Azenha, 2004).

A reação das cinzas dá-se com o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do cimento, formando silicato e aluminato de cálcio semelhantes aos que se formam no endurecimento de materiais hidráulicos (Coutinho, 2002).

As cinzas são usadas com o objetivo de diminuir a quantidade de calor de hidratação gerada, aumentando a durabilidade e impermeabilidade do betão, reduzindo ainda os fenómenos de lixiviação processo de dissolução e transporte de cal hidratada devido ao contacto do betão com a água do rio.

Contudo, apesar do pretendido ser a redução do calor de hidratação, utilizando também cimentos de baixo calor de hidratação, como o cimento pozzolânico de alto-forno, este tipo de alteração do cimento faz com que as suas propriedades mecânicas também se desenvolvam de forma mais tardia, o que pode pôr em causa a segurança estrutural associada ao risco de fendilhação nas primeiras idades.

2.3.4. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NA RESISTÊNCIA DO BETÃO

A figura seguinte representa a evolução da resistência à compressão de provetes de pasta cimento para diferentes condições isotérmicas, respetivamente 5°, 12.5°, 20°, 35° e 50° C (Kjellsen e Detwiler 1993).

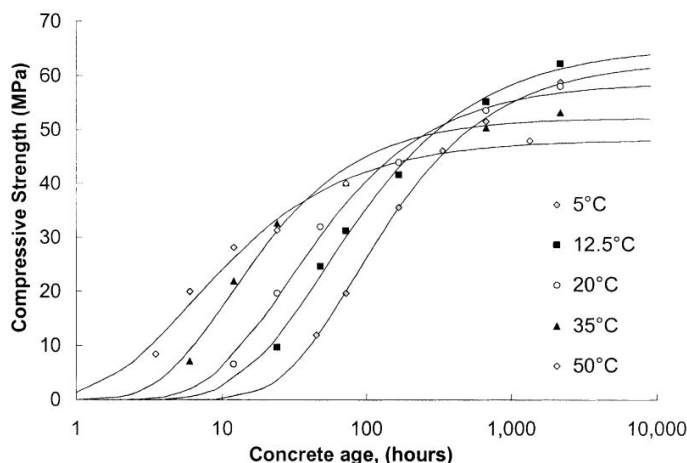


Fig.2.11 – Evolução da resistência à compressão do betão para diferentes temperaturas de cura (Brooks, 2007)

Através da figura anterior conclui-se que a resistência das amostras curadas a 50° C ultrapassa a resistência das amostras curadas a 35° C em apenas 40 horas. Contudo, apesar de para temperaturas mais elevadas a resistência aumentar mais rapidamente nas primeiras horas, a tempo infinito deparamo-nos com uma redução da resistência final. Este facto pode ser constatado, observando que o provete curado a 50° C apresenta uma redução da resistência final de cerca de 17% comparativamente ao curado à temperatura ambiente. Este comportamento descrito anteriormente foi documentado inúmeras vezes para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do betão (Neville 1996 e Carino 1991), denominando-se este fenómeno de “Cross-over effect”, representando a perda de resistência devido à cura do betão a elevadas temperaturas.

3

Problema Mecânico

3.1 INTRODUÇÃO

Após ter sido efetuada a análise térmica da estrutura, tendo como resultados obtidos tanto o campo de temperaturas nos nós como o grau de hidratação, é possível proceder à análise mecânica da mesma.

É importante referir que os resultados obtidos na primeira análise, servem de dados para a análise mecânica, sendo que estes resultados são fornecidos para os nós da estrutura, pelo que, é necessário realizar uma transformação destes para os pontos de Gauss. Esta interpolação é realizada através das funções de forma, uma vez que as tensões e deformações são calculadas nos pontos de Gauss.

A análise mecânica é uma análise muito mais exigente que a análise térmica, pelo que os elementos que compõem a malha têm que ser mais refinados, isto é, o grau da função de forma tem que ser mais elevado.

Como aconteceu na análise anterior, onde a cinemática da reação da hidratação do ligante hidráulico era influenciada pela temperatura, também nesta análise, as propriedades do betão nas primeiras idades são influenciadas tanto pela idade do betão como pela temperatura a que este esteve sujeito na fase de cura. Por isso é essencial para esta análise a discretização da variável temporal.

Para tal, é usual utilizarem-se duas metodologias que permitem em simultâneo contabilizar os efeitos do tempo e do historial de temperaturas, sendo a primeira baseada no Grau de Hidratação e a segunda no conceito de Maturação.

3.2 GRAU DE HIDRATAÇÃO

O conceito de Grau de Hidratação foi abordado no capítulo anterior. Contudo, a maioria dos modelos numéricos que abordam o comportamento do betão nos primeiros dias utiliza esta variável com o objetivo de quantificar o calor libertado.

Durante a fase de hidratação do cimento, devido às transformações micro-estruturais do betão, as características mecânicas do material vão-se alterando. Algumas destas características podem ser definidas em função da evolução do grau de hidratação que representa o avanço do processo de hidratação e é definido pela razão entre a quantidade de cimento que já reagiu num instante e a quantidade total de cimento no instante inicial da reação. No capítulo anterior foi formulado outro método de calcular esta variável baseado na quantidade de calor libertada.

Segundo Rostásy et al, 2001, algumas das propriedades do betão podem ser facilmente definidas em função do grau de hidratação, como a resistência à tração $f_{ct}(\alpha)$, a resistência à compressão $f_c(\alpha)$ e o módulo de elasticidade $E_c(\alpha)$. A seguinte expressão base pode ser aplicada à propriedade pretendida,

X_i , para um determinado grau de hidratação α . Quando a hidratação é completa, ou seja, $\alpha = 1$, esta função atinge o valor máximo dessa determinada propriedade, X_{i1} . Nesta equação α_0 representa o grau de hidratação abaixo do qual as propriedades mecânicas do betão são consideradas nulas, sendo este instante correspondente à transição suspensão-sólido, no qual se desenvolve o esqueleto sólido autoportante do material (Azenha, 2004). Nesta equação, n representa um parâmetro sugerido pelo EC2, assumindo o valor de $2/3$ para a resistência à compressão $f_c(\alpha)$, $1/2$ para o módulo de elasticidade, $E_c(\alpha)$, e 1 para a resistência à tração, $f_{ct}(\alpha)$.

$$X_i(\alpha) = X_{i1} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{n_i}$$

(Equação 3.1)

$$f_c = f_{c1} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{2/3}$$

(Equação 3.2)

$$f_{ct} = f_{ct1} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^1$$

(Equação 3.3)

$$E_c = E_{c1} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{1/2}$$

(Equação 3.4)

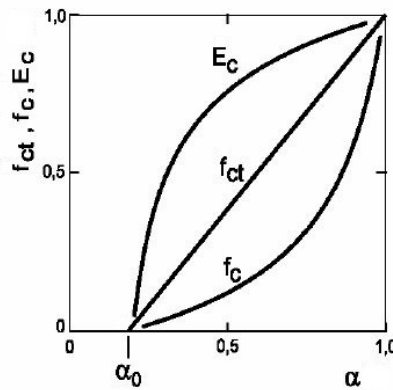


Fig.3.1 – Evolução das Propriedades do Betão com o grau de hidratação (Azenha, 2004)

3.3 MATURAÇÃO

O conceito de Maturação surgiu com a necessidade de conseguir estimar o desenvolvimento das propriedades do betão combinando efeitos da temperatura e tempo. Através dos estudos tanto de Nurse, 1949 como de Saul, 1951, obteve-se uma relação linear entre o desenvolvimento das resistências do betão e o produto do tempo pela temperatura, para diferentes históricos de temperaturas de cura do betão. A equação seguinte, denominada de Equação de Nurse-Saul, representa a função maturação $[\text{°C.h}]$, sendo que a variável T_c corresponde à temperatura média do betão no intervalo de tempo considerado, T_0 a temperatura de referência e Δt o intervalo de tempo entre as medições de temperaturas.

$$M(T, t) = \sum_0^t (T_c - T_0) \cdot \Delta t$$

(Equação 3.4)

O valor da temperatura de referência varia de autor para autor, sendo que Saul (1951) define como mais aconselhável o valor de -10.5 °C . Por sua vez, Carino (1991) recomenda o valor de -10 °C , sendo este o valor mais utilizado hoje em dia. Por último, o ASTM C 1074 (American Society for Testing

and Materials) define um valor de 0 °C para cimentos do tipo 1, não existindo valores para outros tipos de cimento.

Saul, 1951, enuncia a Lei da Maturação “... dois betões com a mesma composição e com o mesmo grau de maturação têm a mesma resistência qualquer que seja o historial de temperaturas que conduziu a esse grau de maturação ...”.

Apenas alguns anos mais tarde se conseguiu definir uma nova função capaz de representar o desenvolvimento da resistência do betão nas primeiras idades. Foi através de Freiesleben Hansen e Pedersen (1977), baseados na Lei de Arrhenius, que se criou a função da idade equivalente (t_{eq}), que converte a idade cronológica de um betão com um histórico de temperaturas de cura qualquer numa idade equivalente para um betão curado a uma temperatura de referência. Por outras palavras t_{eq} corresponde ao tempo que um betão tem de ser curado à temperatura de referência para atingir a mesma resistência obtida sob condições reais de cura, isto é, temperaturas variáveis e diferentes de 20 °C.

Hoje em dia, a maturação é traduzida por uma função mais evoluída, representando a cinética da reação a uma determinada temperatura, expressa seguidamente.

$$M(t, T) = \int_0^t K(T(\tau)) d\tau$$

(Equação 3.5)

$$t_{eq} = \int_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T(ref)} \right)} d\tau$$

(Equação 3.6)

A próxima equação incluída no MC90 representa o mesmo que a expressão 3.6, substituindo o integral por somatórios, a temperatura em graus Celsius e $\frac{E_a}{R} = 4000$ K.

$$t_{eq} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot e^{\left(13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i)}{T_0}} \right)}$$

(Equação 3.7)

Como definido anteriormente para o grau de hidratação, também é possível através da idade equivalente estabelecer funções capazes de definir analiticamente a evolução das propriedades mecânicas do betão. Para tal, definiu-se uma função base incluída no EC2, X_i , que relaciona a idade equivalente com cada uma das propriedades, sendo elas, como referido anteriormente, a resistência à tração $f_{ct}(\alpha)$ e a resistência à compressão $f_c(\alpha)$. O módulo de elasticidade $E_c(\alpha)$, por outro lado, é formulado a partir de uma expressão diferente, tendo por base a resistência à compressão adquirida numa determinada idade comparativamente com a que irá obter aos 28 dias.

Esta função tem como máximo o valor dessa propriedade aos 28 dias, X_{28} . São ainda definidos dois parâmetros:

- O parâmetro s que varia entre 0.2 e 0.38 conforme o tipo do cimento utilizado;
- O parâmetro n definido pelo EC2, assumindo valor de 1 para a resistência à compressão e para a resistência à tração os valores de 1 para $t < 28$ dias e $2/3$ para $t > 28$ dias.

$$X_i(t_{eq}) = X_{28} \cdot \left[e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}}\right)} \right]^n \quad (\text{Equação 3.8})$$

$$f_c(t) = f_{ct28} \cdot \left[e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}}\right)} \right]^1 \quad f_{ct}(t) = f_{ct28} \cdot \left[e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}}\right)} \right]^{\frac{2}{3}} \quad E_c(t) = E_{c28} \cdot \left[\frac{f_c(t)}{f_c} \right]^{0.3}$$

(Equação 3.9)

(Equação 3.10)

(Equação 3.11)

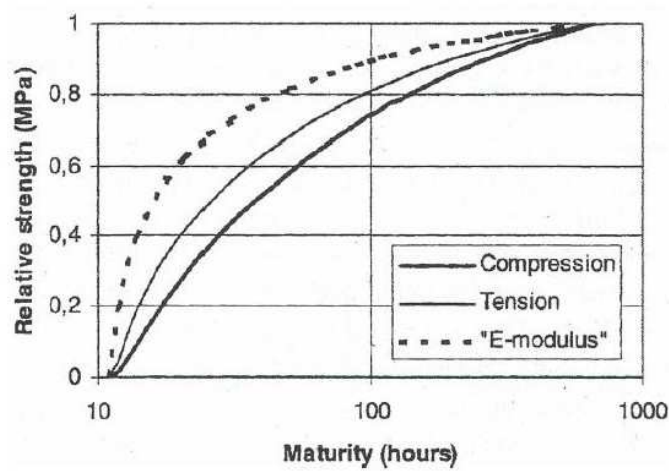


Fig.3.2 – Evolução das Propriedades do Betão com a idade equivalente (Ji, 2008)

3.4 FLUÊNCIA

Quando é aplicada a um provete uma tensão menor do que a tensão de rotura do betão, num determinado instante, gera-se uma deformação instantânea. Mantendo a tensão durante um certo intervalo de tempo, verifica-se um aumento de deformação ao longo do tempo, que se designa por deformação por fluência.

Este comportamento é designado viscoelástico linear e representa que as extensões são proporcionais às tensões aplicadas e aumentam sob tensão constante. Contudo, para que se possa aplicar esta propriedade alguns pressupostos têm que ser garantidos (Bazant, 1982):

- As tensões aplicadas têm que ser inferiores a 40% da tensão de rotura;
- As extensões não podem diminuir em magnitude, sendo que as tensões podem;
- A fluência de secagem não seja significativa;
- Não ocorra um aumento exponencial das tensões após o carregamento inicial.

Diversos estudos demonstram que esta linearidade é garantida para tensões inferiores a 60% da tensão de rotura à tração (Ji 2008, Hauggaard 1997 e Atrushi 2003). Contudo, é também demonstrado que quando aumentamos esta ordem de grandeza, para 60 a 80 % a não linearidade deste comportamento aparece.

Como tal, é necessário utilizar modelos de fluência que em simultâneo representem a natureza evolutiva das propriedades mecânicas do betão.

A seguinte expressão demonstra esta proporcionalidade entre a deformação total $\varepsilon_{tot}(t, t')$ para cada instante com a tensão $\sigma(t')$ aplicada num instante t' , sendo que a função $J(t, t')$ representa a função de fluência.

$$\varepsilon_{tot}(t, t') = J(t, t') \cdot \sigma(t')$$

(Equação 3.12)

Geralmente a fluência é dividida em fluência básica, que se desenvolve em condições de estabilidade higrotérmica com o meio envolvente, sem trocas de humidade, avaliada com recurso a provetes selados e em fluência de secagem consequência do processo de secagem do betão, também conhecida por Efeito de Pickett.

Os seguintes fatores influenciam fortemente a fluência (Batista, 1998):

- Valores crescentes do módulo de elasticidade, da percentagem e dimensão máxima dos agregados, bem como da resistência à compressão, conduzem a uma diminuição da deformação por fluência;
- Quanto mais jovem for o betão e maior for o período de tempo sob carga, maiores serão as deformações por fluência;
- Diminuição do elemento estrutural e humidade ambiente crescentes implicam uma diminuição das deformações por fluência.

O fenómeno de fluência no betão durante as primeiras idades tem grande relevância, na medida em que a evolução das propriedades mecânicas leva a que o nível de tensão em relação à resistência diminua ao longo do processo de hidratação. Isto deve-se ao facto de durante o processo de hidratação do cimento continuarem a formar-se partículas de gel criadas sob tensão nula (Azenha, 2004).

Nas estruturas de grande dimensão, como barragens, considera-se uma boa aproximação que para as simulações da fluência nas primeiras idades apenas se considere o efeito da fluência básica, na medida em que, no período de tempo em análise, o fenómeno de secagem apenas afeta uma zona muito superficial do betão, apenas 1 a 2 cm (Emborg 1998 e Rostásy et al 2001).

Deste modo, e no seguimento do presente trabalho, será utilizada a Lei da Dupla Potência, também conhecida por Lei de Bazant-Panula, que possui um campo de aplicação bastante vasto.

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0(t')} + \frac{\phi_1}{E_0(t')} \{ (t')^{-m} + \alpha_{DPL} \} (t - t')^n$$

(Equação 3.13)

Nesta expressão t corresponde à idade do betão e t' à idade do carregamento, ambos em dias. Por sua vez, n , m , α_{DPL} e ϕ_1 correspondem a parâmetros que têm em conta a composição do betão, a resistência à compressão do betão, a relação w/c e o tipo de cimento utilizado respetivamente. O valor mais difícil de estimar é o E_0 , módulo de elasticidade assintótico do betão que condiciona fortemente os resultados obtidos, uma vez que define a separação entre a parcela de deformação instantânea e a parcela da deformação por fluência.

Devido às grandes flutuações de tensão nas primeiras idades do betão e, visto que, os períodos de análise são bastante reduzidos, é conveniente a utilização de séries de Taylor no cálculo desta função. Com estas séries passa a ser possível calcular acréscimos de tensão e respetivas deformações, a serem somadas a uma parcela total, atualizando em cada incremento as propriedades do betão.

As figuras seguintes representam um elemento de betão sujeito a uma tensão constante durante o intervalo de tempo de t_0 a t . Facilmente se constata que no instante em que a força é aplicada gera-se uma deformação instantânea que é seguida de uma extensão que evolui com o tempo, deformação por fluência. O papel do coeficiente E_0 atrás enunciado é definir qual a quantidade que pertence a cada parcela.

Quando no instante t se remove a força dá-se uma recuperação de apenas uma parte da parcela da deformação instantânea, bem como a forma como se recupera a deformação por fluência é feita por uma taxa bastante menor do que a gerada. Isto deve-se ao facto de as propriedades mecânicas do betão evoluírem no tempo. Obtêm-se, desta forma, uma deformação residual que o corpo não consegue eliminar.

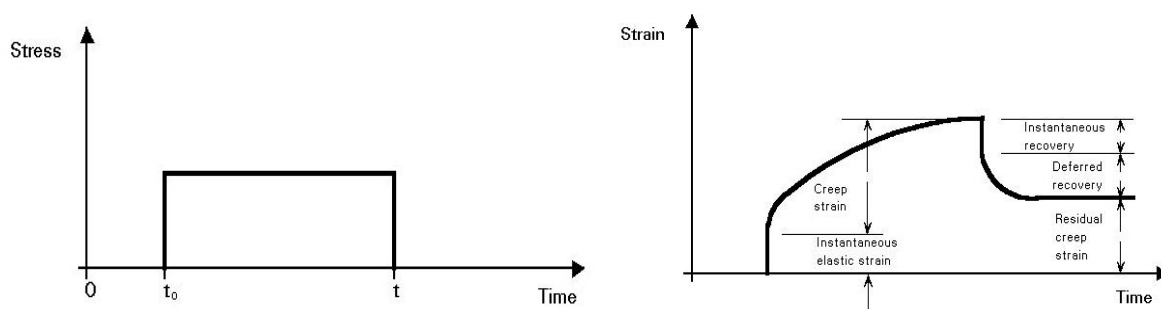


Fig.3.3 – Deformação por fluência (Batista, 1998)

3.5 RETRAÇÃO

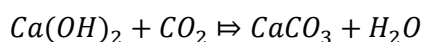
Para além das deformações causadas por carregamentos e variações de temperatura, existem também deformações devidas à perda de água e reações internas do betão, denominadas de deformações por retração. A retração divide-se nas componentes de secagem, autógena e carbonatação. Numa análise como esta, a última não é muito importante.

Conclui-se que nos betões normais a retração de secagem apresenta maior relevância do que a retração autógena, pelo que, nos betões de alto rendimento constata-se o inverso.

3.5.1. RETRAÇÃO DE CARBONATAÇÃO

A reação de carbonatação deve-se à interação química entre o dióxido de carbono atmosférico e produtos de hidratação do cimento (Mehta e Monteiro 1993). Esta reação resulta em pequenas retrações e na redução do pH do betão, podendo provocar a sua deterioração, fissuração e corrosão primária das armaduras (Kosmatka e Panarese 1988).

A seguinte equação traduz a reação química a que se deve o fenómeno de retração por carbonatação, devendo referir-se que a quantidade de carbonatação depende da densidade do betão, quantidade de cimento, do ambiente e do tempo de exposição. Esta reação geralmente afeta as camadas superficiais expostas numa profundidade de cerca de 2 cm.



(Equação 3.14)

3.5.2. RETRAÇÃO DE SECAGEM

A retração de secagem resulta na redução do volume de betão devido à perda de água para o ambiente. Este tipo de retração é mais preponderante nos betões normais, betões com maior volume de rede capilar. Inicialmente, a água livre evapora pelas superfícies, sendo que quando toda esta água já se evaporou, o betão irá continuar submetido à retração de secagem e a água em excesso será expulsa do seu interior. Geralmente este tipo de retração origina fissuração das superfícies do betão (Mindess e Young 1981). Grande quantidade desta perda de água é reversível quando sujeita a um aumento da humidade exterior durante a cura. Para ambientes muito húmidos esta retração deixa de ter efeitos significativos.

3.5.3. RETRAÇÃO AUTOGÉNEA

A retração autogénea do betão é definida como a variação macroscópica do volume sem transferências de humidade com o ambiente que o envolve. Esta retração deve-se à retração química que ocorre durante a hidratação das partículas de cimento (Japan 1999).

A reação química entre o cimento e a água origina uma redução de volume, de tal forma que a água quimicamente combinada sofre uma contração de 25% do seu volume original (Kalintzis 2000). Por outro lado, esta contração da pasta do cimento é restringida pelo esqueleto sólido da pasta já hidratada e também pelas partículas do agregado (Neville 1997).

A retração autogénea é tanto mais significativa quanto mais elevadas forem as temperaturas, maiores os teores do cimento e relações água/cimento do betão (Neville 1997).

3.6 BETÃO EM MASSA

3.6.1. ARREFECIMENTO DE UMA BARRAGEM

O betão em massa é utilizado em estruturas não armadas, ou seja, em estruturas que estão predominantemente sujeitas a esforços de compressão. No caso específico de uma barragem, a garantia da sua estabilidade com tensões predominantemente de compressão pode exigir volumes de betão na ordem dos muitos milhares de metros cúbicos.

É, por isso, necessário ter algumas precauções quando se projeta este género de estruturas, na medida em que as restrições às variações de volume devidas à libertação de calor geram tensões de tração que podem vir a causar fissuração do betão, o que não é nada desejáveis neste tipo de estruturas.

Devido ao baixo valor de condutividade térmica do betão, o calor gerado devido à reação do cimento com a água pode demorar muito tempo a dissipar-se. Como tal, existem diversos métodos de arrefecimento do betão capazes de acelerar este processo, que tem como fim o equilíbrio térmico.

A primeira grande utilização de arrefecimento artificial do betão foi utilizada na Barragem de Hoover, sem o qual esta enorme barragem demoraria cerca de 200 anos até atingir o equilíbrio térmico. Este arrefecimento foi obtido através da circulação de água a baixas temperaturas no interior do betão. Esta medida tinha como principal objetivo acelerar o processo de contração dos diferentes blocos da barragem, para que com isto se pudesse injetar as juntas (com argamassa), assegurando, assim, o monolitismo desejado da barragem.

Esta medida tornou-se bastante comum, alterando-se apenas o instante no qual se inicia o arrefecimento da barragem, que na barragem de Hoover começou alguns dias após a betonagem, tendo-se passado a partir de então, a iniciar o arrefecimento imediatamente após a betonagem.

Em meados de 1960, na Barragem de Dworshak iniciou-se um método ligeiramente diferente do anterior, no qual o arrefecimento do betão através de condutas de água era interrompido sempre que a temperatura do betão caísse abruptamente após ter atingido o pico de temperatura. No intervalo de 1 a 3 dias, quando a temperatura tornasse a subir, até atingir o pico anterior, o sistema de arrefecimento iniciava-se novamente, conseguindo, desta forma, um controlo mais rigoroso e seguro da temperatura.

Outro método capaz de controlar a geração de calor no betão é o pré-arrefecimento dos seus constituintes. Na verdade, através da substituição de parte da água da amassadura por gelo, do arrefecimento dos agregados e através de nitrogénio líquido, é possível obter temperaturas de betonagem na ordem dos 10° C. Isto faz com que a temperatura final do betão após a libertação do calor de hidratação do ligante hidráulico seja bastante inferior ao habitual, sendo o processo de restituição do equilíbrio térmico bastante mais rápido. Este último processo, arrefecimento através de nitrogénio líquido antes da colocação do betão, tem vindo a ser muito utilizado nos últimos anos, pois apesar de não ser tão prático como os outros, é bastante mais económico, sendo os resultados obtidos bastante satisfatórios (Koschenz e Dorer, 1999).

Por último, o isolamento das superfícies é outro dos métodos muito utilizados, na medida em que no inverno, quando as superfícies estão expostas a quedas de temperatura consideráveis, com o isolamento térmico o risco de fendilhação diminui.

3.6.2. SERPENTINAS DE REFRIGERAÇÃO

Em estruturas como uma barragem, o arrefecimento tem que ser muito controlado, pois um arrefecimento rápido corresponde a um grau de refrigeração elevado, podendo originar gradientes térmicos consideráveis passíveis da fissuração do betão, pondo em causa a integridade estrutural da barragem. Por outro lado, dada a elevada espessura da mesma, pode concluir-se que o seu núcleo se comporta como um meio quase adiabático, sendo o pico de temperatura atingido aproximadamente igual ao que seria espectável em condições adiabáticas.

Os esforços de tração desenvolvem-se de duas formas, nomeadamente, originadas pela dissipação de calor ou pelos ciclos de alteração da temperatura ambiente.

A primeira forma deve ser contrariada, tentando que o betão liberte o mínimo de calor possível, devendo, para tal, usar-se a menor quantidade de cimento necessária para obtermos a resistência mínima capaz de equilibrar a estrutura. Para o efeito, podemos substituir parte do cimento por cinzas, que libertam menor quantidade de calor. Outro método consiste em utilizar cimentos especiais que possuem baixo calor de hidratação ou libertam calor de uma forma lenta (low heat).

Por último, pode também concluir-se que se a temperatura de colocação for mais baixa que o normal até um certo nível, a reação não se inicia, pois não existe energia de ativação mínima. Conclui-se assim, que a temperatura final obtida após a hidratação do cimento é mais próxima da temperatura de equilíbrio térmico, sendo mais rápido o processo de arrefecimento da estrutura.

A segunda forma corresponde ao efeito dos ciclos de temperatura na fendilhação do betão. Destes destacam-se, em primeiro lugar, os ciclos de temperatura diários que afetam apenas as camadas superficiais da estrutura. Por outro lado, os ciclos anuais de temperatura também são bastante relevantes, na medida em que, afetam camadas bastante mais profundas do betão.

O método do arrefecimento artificial do betão é possivelmente o que melhores resultados obtém, sendo, contudo, dos que necessita maior controlo de todo o processo de arrefecimento, pois atua no interior do betão.

Facilmente, se conclui que como o Módulo de Elasticidade do Betão assume valores baixos nos primeiros dias após a betonagem, a taxa de calor retirado do betão através deste processo pode ser elevada. Após ser atingido o pico de temperatura do betão, o seu módulo de elasticidade aumenta rapidamente, sendo desta forma necessário diminuir a taxa de calor retirado do mesmo, obtendo assim, relaxação do betão.

A quantidade de calor retirado através das serpentinas depende de diversos fatores, como diâmetro, material e afastamento dos tubos e caudal e temperatura de líquido circulante.

Este método origina um campo de temperatura radial isotérmico em cada ponto das serpentinas, em que a temperatura vai aumentando à medida que nos vamos aproximando do fim da conduta. Verifica-se que condutas de menores diâmetros com um fluido mais frio geram condições mais agressivas que condutas de maiores diâmetros com um fluido mais quente. Salienta-se que quando este arrefecimento é rápido e o gradiente térmico provocado é muito elevado, pode originar fissuras locais e radiais.

3.6.3. EFEITO DE UMA REDE DE SERPENTINAS DISPOSTAS EM NINHO DE ABELHAS

Consideremos agora uma série de tubos paralelos uniformemente distribuídos no interior da estrutura de betão. Num corte na direção normal a estes tubos, facilmente compreendemos que a sua distribuição se aproxima a um conjunto de hexágonos regulares justapostos, formando, assim, um “ninho de abelhas” ou uma “rede hexagonal” (Stucky 1957).

Uma das simplificações possíveis seria considerar que o valor da temperatura da água desde que entra na serpentina até que sai não varia. Contudo, esta suposição imporia que o caudal de água que circula dentro das serpentinas fosse infinito, visto existir troca de calor entre o betão e a água.

Em qualquer instante, a quantidade de calor transferido é proporcional à diferença de temperatura entre o betão e a água. Inicialmente a quantidade de calor retirado pela água é grande, diminuindo com os ciclos de circulação da água, pois a temperatura do betão vai baixando até se atingir o equilíbrio térmico. A este fenómeno chama-se de fluxo térmico interno. Para calcular a temperatura da água no interior das serpentinas em qualquer ponto é necessário considerar que o princípio da conservação de energia é válido. Isto significa que o calor transferido do betão para as serpentinas é igual ao calor absorvido pela água em circulação.

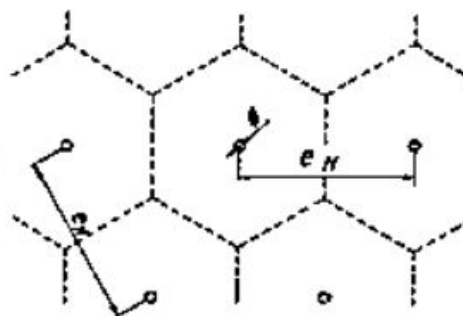


Fig.3.4 – Representação das serpentinas em ninho de abelhas (Stucky, 1957)

Contudo, o problema surge quando é necessário quantificar coeficientes que descrevam os dois fenómenos associados a esta refrigeração. Primeiro a transferência de calor por condução do betão hidratado para as serpentinas de PEAD e, em segundo lugar, a convecção existente entre o fluido em movimento no interior das serpentinas, neste caso, água e a superfície que o envolve, a serpentina.

O coeficiente de convecção da água no interior das serpentinas varia ao longo destas consoante o fluxo da água é turbulento ou laminar. Segundo JCI (Japan Concrete Institute) este coeficiente depende unicamente da velocidade de circulação da água, sendo expresso pela seguinte expressão:

$$h_w = 4.75 \cdot u + 43.0$$

(Equação 3.15)

Na equação anterior u representa a velocidade da água no interior da serpentina [cm/s]. Esta equação pode ser aplicada desde que a velocidade de circulação não seja nem superior a 60 cm/s nem inferior a 20 cm/s.

O calor transferido por unidade de tempo (q_{supply}) do betão para a serpentina pode ser expresso através da Lei de Newton, como se consegue constatar através da seguinte expressão.

$$q_{supply} = h_w A_w (T_{s,med} - T_{w,med}) = h_w (\pi D L) \left(\frac{T_{s,in} + T_{s,out}}{2} - \frac{T_{w,in} + T_{w,out}}{2} \right)$$

(Equação 3.16)

Em que h_w representa coeficiente de convecção da água no interior das serpentinas, A_w a área da superfície das serpentinas, D o diâmetro da serpentina, l a distância entre a entrada e saída de água (comprimento da serpentina). $T_{s,in}$ e $T_{s,out}$ representam a temperatura de entrada e saída da serpentina e $T_{w,in}$ e $T_{w,out}$ a temperatura de entrada e saída da água de refrigeração.

O calor retirado pela água por unidade de tempo, q_{cool} , pode ser descrito segundo a seguinte expressão:

$$q_{cool} = q_{cool,out} - q_{cool,in} = Q_w \rho_w c_w (T_{w,out} - T_{w,in})$$

(Equação 3.17)

Nesta expressão, Q_w representa o caudal que circula no interior da serpentina, ρ_w a massa específica da água e c_w o calor específico da água.

Pelo princípio da conservação de energia, a Eq 4.5 é equivalente à Eq 4.6, pelo que, se três das temperaturas já forem previamente conhecidas, $T_{s,in}$, $T_{s,out}$ e $T_{w,in}$, é possível determinar a temperatura incógnita, $T_{w,out}$, através da seguinte equação:

$$T_{w,out} = \frac{(C_1 - C_2)T_{w,in} + C_2(T_{s,in} - T_{s,out})}{(C_1 + C_2)}$$

(Equação 3.18)

Onde $C_1 = Q_w \rho_w c_w$ e $C_2 = h_w \pi D \frac{l}{2}$. A figura seguinte sintetiza o princípio da conservação de energia no fenómeno de refrigeração do betão através de serpentinas.

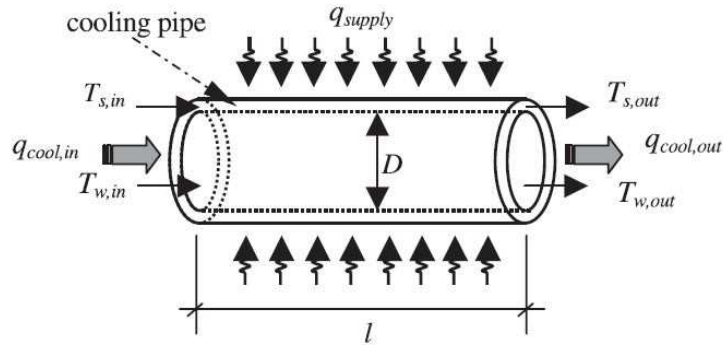


Fig.3.5 – Princípio da conservação de energia (Kim e Yang, 2000)

No caso de Baixo Sabor, apesar de serem conhecidas algumas temperaturas de entrada e saída da água de refrigeração nas serpentinas, a introdução no modelo da barragem de todos os ramos das serpentinas seria impraticável. Isto deve-se ao facto de a forma da barragem ser bastante complexa para as serpentinas serem introduzidas e também porque levaria a um aumento do tamanho desmesurado do modelo, tornando-o de aplicação inviável.

Como tal, optou-se por encontrar uma solução que representasse o fenómeno de refrigeração do betão através de uma manipulação da curva adiabática do betão. Isto é, segundo o projeto, a primeira refrigeração, que tem uma duração de 16 dias, do 4º ao 20º dia, corresponde a contrariar o acréscimo adiabático de cerca de 4.5º C. Portanto, e como se consegue concluir através da figura seguinte, o betão passa a aquecer menos 4.5º C, calor que seria retirado pelas serpentinas.

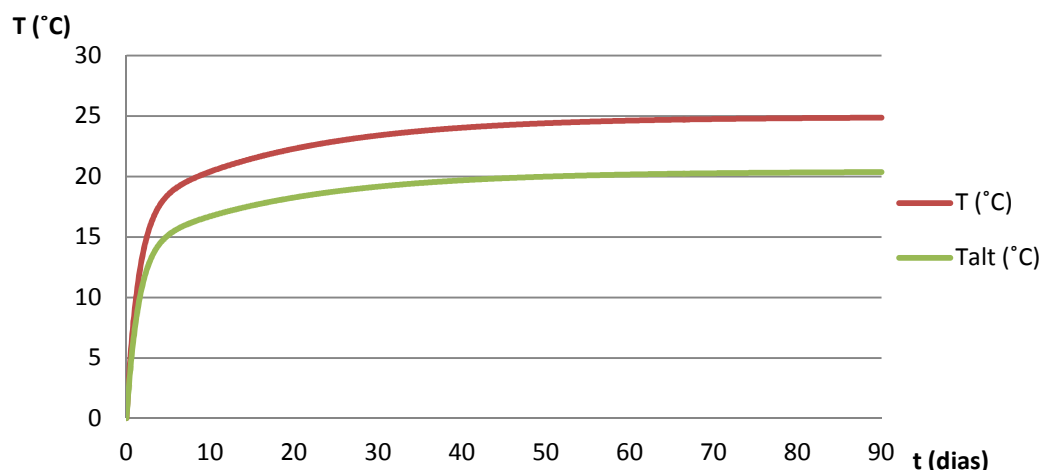


Fig.3.6 – Manipulação da Curva Adiabática do Betão

Nesta primeira refrigeração, a água que circula no interior das serpentinas é captada diretamente do rio, isto é, não é arrefecida na central de refrigeração. Verifica-se também que as taxas diárias de arrefecimento não ultrapassam $0.55^{\circ}\text{C}/\text{dia}$, o que se encontra dentro do limite recomendado (EDP, 2007).

Por outro lado, a segunda refrigeração, final e definitiva, que se inicia 3 meses antes da injeção das juntas de contração, tem como objetivo arrefecer artificialmente os betões até à temperatura de injeção destas. Logo, dependendo da espessura de cada camada, é estimada a temperatura de circulação de água.

3.6.4. MODELO SERPENTINAS

O exemplo seguinte foi criado com o objetivo de comprovar a simplificação descrita anteriormente, tendo-se, para tal, criado um corpo de betão com serpentinas no seu interior. Este modelo apesar de ter uma dimensão infinitesimal comparativamente com a barragem, obedece aos mesmos pressupostos de afastamentos horizontal e vertical, definindo, assim, a mesma malha hexagonal. As expressões atrás enunciadas, foram transformadas em ábacos por Stucky, sendo a sua aplicação mais rápida e fácil, como se irá verificar seguidamente.

O modelo é definido por um bloco de betão com as mesmas propriedades daquele que constitui o núcleo da barragem, possuindo doze metros de largura, seis de comprimento e dois metros de altura. As serpentinas têm um comprimento total de trinta e oito metros e o seu espaçamento é de dois metros tanto na vertical como na horizontal, o que corresponde a um espaçamento em rede hexagonal de 2.25 metros.

A seguinte imagem, é retirada do *software* DIANA e representa o modelo tridimensional criado, estando representados os diferentes ramos da serpentina a vermelho.

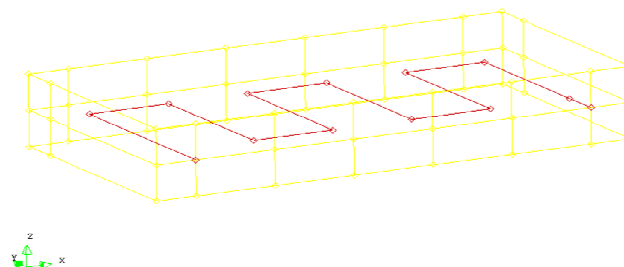


Fig.3.7 – Modelo Tridimensional do Bloco de Betão com serpentinas

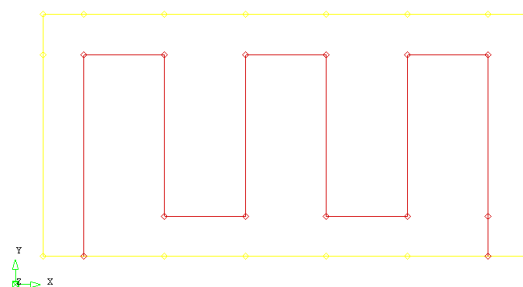


Fig.3.8 – Planta do Modelo Tridimensional do Bloco de Betão com serpentinas

Através da curva adiabática do betão, que representa a evolução da temperatura do betão com o tempo, determinou-se a temperatura final do mesmo após a hidratação completa do cimento. Apesar de não conseguirmos determinar o instante em que a reação termina, considerou-se que esta está completa aos 90 dias, tendo atingido uma temperatura final de 44.8 ° C.

A temperatura da água do rio varia ao longo do ano, sendo que para este modelo se considerou que a água circula a uma temperatura constante de 22.5 ° C, valor ligeiramente superior à média, mas que ocorre em épocas de Primavera e Verão.

Como conseguimos constatar pelo modelo tridimensional, cada serpentina tem uma área envolvente de 4 m² em rede retangular, que quando convertida numa rede hexagonal corresponde a uma área de 4,4 m². Como se viu anteriormente a extensão da serpentina é de 38 metros, logo o volume de betão que irá ser afetado pela rede de serpentinas é de 167.2 m³.

Como salientado anteriormente, o efeito das serpentinas é equivalente a uma redução de 4.5° C da temperatura final do betão em condições adiabáticas e, como tal, o nosso modelo desenvolver-se-á também em condições adiabáticas. O grau de refrigeração máximo recomendado é 0.6° C/dia, sendo que o utilizado no nosso modelo é obtido pela seguinte expressão demonstrada por Stucky:

$$\Omega = \frac{-\ln\left(\frac{\theta_{bt} - \theta_w}{\theta_{b0} - \theta_w}\right)}{t_{dias}} = \frac{-\ln\left(\frac{40.3 - 22.5}{44.8 - 22.5}\right)}{16} = 0.014046 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{dia}$$

(Equação 3.19)

Pode concluir-se que este valor é mais reduzido que o aplicado na barragem, uma vez que a extensão das serpentinas é bastante inferior ao utilizado em cada camada.

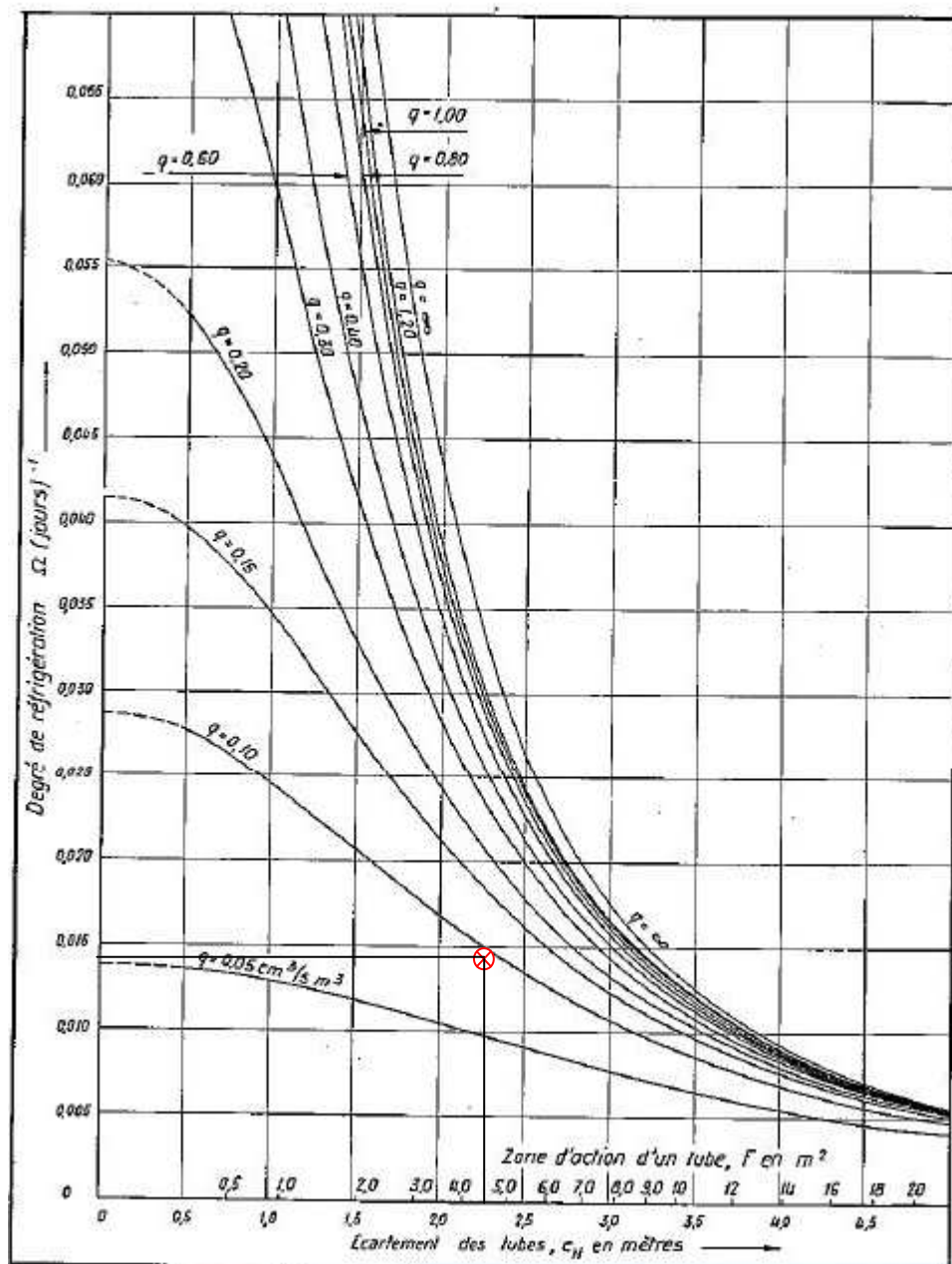


Fig.3.9 – Grau de Refrigeração em função do espaçamento das serpentinas (Stucky, 1957)

Através do auxílio do ábaco anterior foi possível determinar o caudal que circula no interior da serpentina, aproximadamente $0,10 \text{ cm}^3/\text{s}$ por metro cúbico de betão. O volume de betão afetado pela serpentina é de $167,2 \text{ m}^3$, logo o caudal efetivo é de $16,72 \text{ cm}^3/\text{s}$ ou $0,01672 \text{ l/s}$.

O betão utilizado foi o mesmo do núcleo da barragem, betão do tipo 150.200.50, constituído por uma mistura de cimento CEM I 42,5 R e cinzas volantes sílico aluminosas, definido a partir da sua curva adiabática descrita anteriormente.

Para as serpentinas foi necessário definir o coeficiente de condutibilidade aparente K , que representa tanto o efeito de convecção da serpentina e a água, bem como da condução do calor da serpentina para o betão. Segundo Kim (2000), esta constante assume o valor de $60 \text{ Kcal}/(\text{m.h.}^\circ\text{C})$ o que corresponde a

80.7 J/(m.s.°C). Foi também necessário definir uma constante denominada de capacidade de escoamento (*capacity flow*), que representa o produto do calor específico da água pelo caudal a que a água circula no interior das condutas. Esta constante, no seguimento dos nossos cálculos, apresenta um valor de 80.96 J/(K.s).

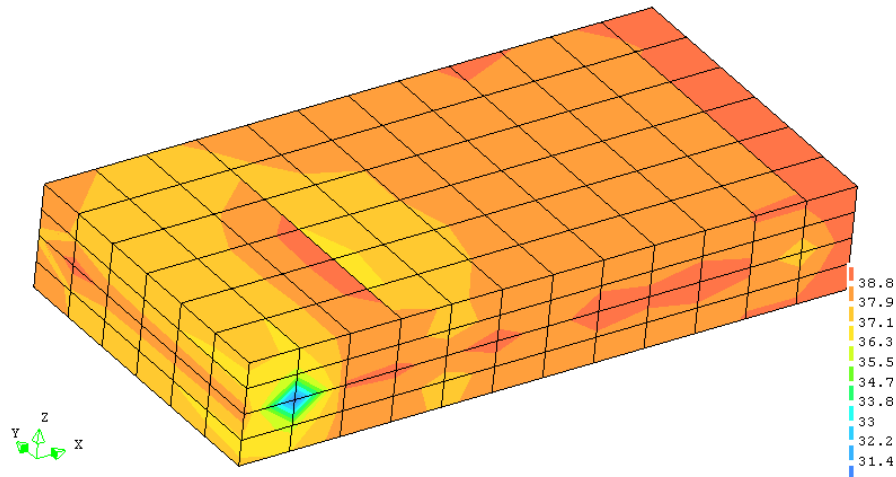


Fig.3.10 – Representação Tridimensional do Campo de Temperaturas no bloco de betão

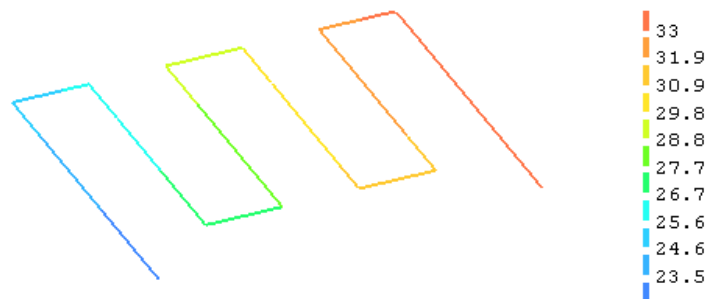


Fig.3.11 – Representação Tridimensional do Campo de Temperaturas na serpentina

Através das duas imagens anteriores conclui-se que as serpentinas estão a retirar calor ao betão que está a ser hidratado. Facilmente se constata, pelo degradé de cores, que o ponto de entrada de água se situa mais à esquerda da peça, logo a parte contrária da peça estará mais quente. A próxima figura representa uma evolução adiabática das temperaturas num ponto central da peça. Se se comparar esta curva com a manipulada por nós, conclui-se que os erros introduzidos naquela simplificação, não vão alterar os resultados obtidos.

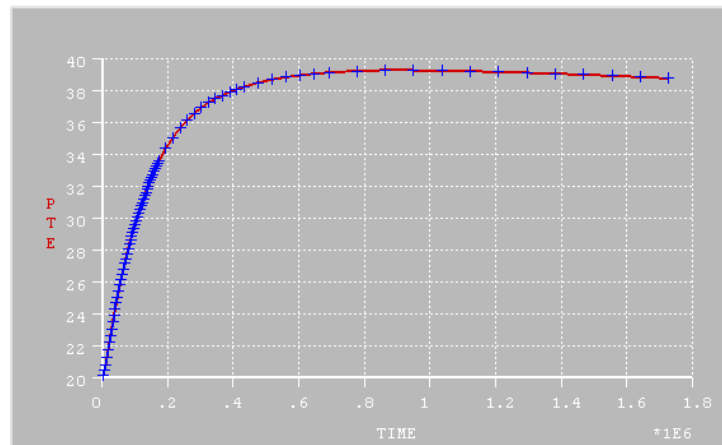


Fig.3.12 – Curva adiabática obtida a partir do modelo tridimensional de serpentinhas

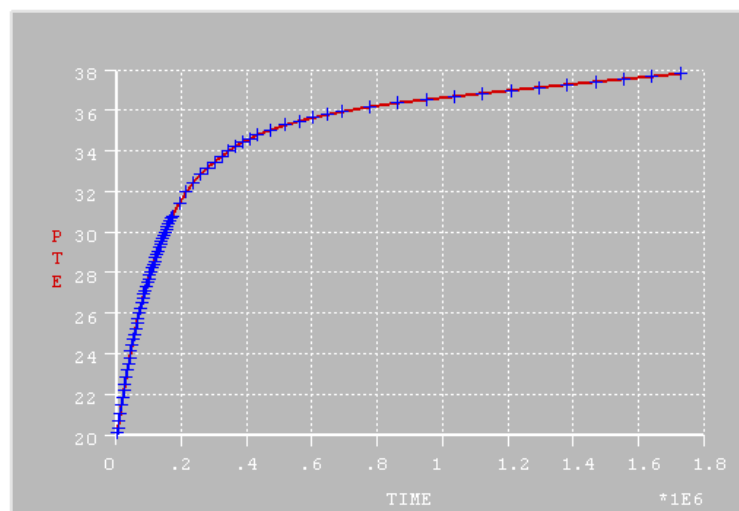


Fig.3.13 – Curva adiabática obtida a partir da manipulação da geração de calor do betão

4

Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO

O aproveitamento situa-se no distrito de Bragança mais concretamente na freguesia de Torre de Moncorvo. Este aproveitamento é caracterizado por dois escalões afastados de 9 km. O primeiro, denominado de escalão de montante, consiste numa barragem abóbada de dupla curvatura, cuja finalidade é criar uma albufeira artificial com 1095 hm³, com um nível de pleno armazenamento (NPA) e um nível máximo de cheia (NMA) de 234 e 235 metros, respetivamente. Por outro lado, o escalão de jusante é constituído por uma barragem do tipo gravidade, com o objetivo de garantir o contraembalse da barragem de montante e a regularização do caudal no trecho intermédio entre os dois escalões. Este escalão, por sua vez, possui o NPA de 138 metros, sendo que a parte central da estrutura é galgável através de um descarregador de superfície.

O presente trabalho apenas aborda aspetos estruturais referentes ao escalão de montante, sendo esta uma barragem estruturalmente mais complexa e de dimensões mais elevadas comparativamente ao escalão de jusante.

Este aproveitamento apresenta um armazenamento útil de 630 milhões de m³ de água na albufeira, uma potência de 170 MW e é espetável uma produção média anual de 444 GWh. Através da construção deste aproveitamento, à qual corresponde um investimento de aproximadamente 481 milhões de euros (valor de 2008), para a mesma energia produzida não serão emitidos para a atmosfera cerca de 481 Kt de CO₂ por ano.

O escalão de montante dispõe dos seguintes órgãos de segurança: descarregadores de cheia situados ao nível do coroamento constituídos por 4 orifícios de igual vão, controlados por comportas, elementos através do qual a água excedentária na albufeira, em situação de cheia, é escoada para o canal de jusante, evitando o galgamento da estrutura; uma descarga de fundo, situada na prumada do pilar central do descarregador de cheias ao nível da base da estrutura, sendo equipada com comportas, usada apenas quando é necessário proceder ao esvaziamento total da albufeira, em situações como obras de manutenção e reparação da barragem.

A implantação da barragem no local selecionado foi condicionada por questões tanto de índole topográfica como de natureza geológica. No que toca às primeiras, tentou localizar-se a barragem no local onde o vale é mais simétrico e encaixado. Por outro lado, relativamente aos acidentes geológicos do local, a margem esquerda possui uma falha à qual está associada um filão de quartzo, que impediu que a barragem fosse implantada mais a montante.

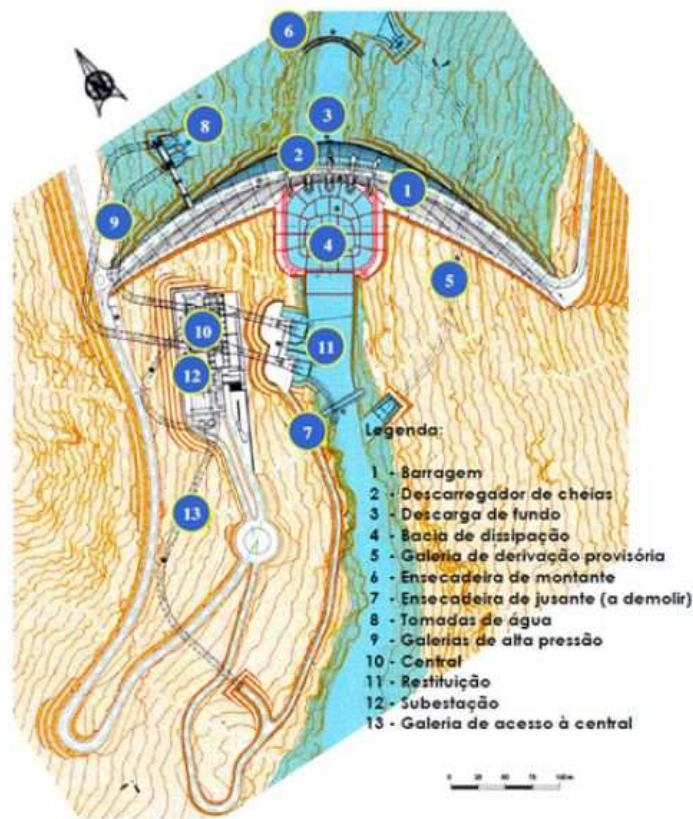


Fig.4.1 – Aproveitamento Hidroelétrico Baixo Sabor - Escalão de Montante (EDP, 2007)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA FORMA

4.2.1. DEFINIÇÃO ANALÍTICA

Como já foi referido anteriormente, o escalão de montante é caracterizado por uma barragem de dupla curvatura, sendo as diretrizes dos seus arcos horizontais definidas por parábolas de 2º grau. O referencial geral (OXYZ), cuja origem O se situa no fecho da diretriz do arco do coroamento à cota 236, é definido através de:

- o eixo dos YY é horizontal, radial, com direção aproximada do eixo do rio e sentido positivo montante-jusante;
- o eixo dos ZZ é vertical e orientado positivamente de cima para baixo;
- o eixo dos XX forma com os anteriores um triedro direto sendo o seu sentido positivo dirigido para a margem esquerda.

Através deste sistema de eixos, podemos definir a linha média de qualquer arco horizontal à profundidade Z, recorrendo a uma equação do tipo:

$$Y = \frac{X^2}{2P_z} - az$$

(Equação 4.1)

Sendo p_z o parâmetro genérico da parábola diretriz desse arco e a_z a diretriz vertical do fecho, ambos definidos através de profundidade Z, como facilmente se consegue constatar no quadro seguinte.

Quadro 4.1 – Leis definidoras dos parâmetros p_z e a_z

p_z	$195 - 3.8734 \times 10^{-1} Z - 1.1670 \times 10^{-2} Z^2 - 1.5835 \times 10^{-5} Z^3 + 5.4031 \times 10^{-7} Z^4$
a_z	$0.3471 \times Z - 5.4992 \times 10^{-3} Z^2 + 1.9068 \times 10^{-4} Z^3 - 4.6444 \times 10^{-6} Z^4 + 6.0804 \times 10^{-8} Z^5$ $+ 6.0804 \times 10^{-8} Z^5 - 4.4715 \times 10^{-10} Z^6 + 1.6751 \times 10^{-12} Z^7 - 2.3712 \times 10^{-15} Z^8$

Por outro lado, a espessura medida na normal à linha média de cada arco a uma dada cota é definida pela seguinte expressão:

$$e = e_0 \left[1 + A \left(\frac{X}{100} \right)^2 \right]$$

(Equação 4.2)

Onde e_0 corresponde à espessura da consola de fecho em metros e A à lei de crescimento das espessuras para a nascentes, estes dois parâmetros também são funções da profundidade Z e são definidos através das funções representadas no quadro seguinte.

Quadro 4.2 – Leis definidoras dos parâmetros e_0 e A

e_0	$6 + 0.1288 \times Z + 3.6987 \times 10^{-3} Z^2 + 7.0198 \times 10^{-5} Z^3 - 4.8511 \times 10^{-6} Z^4$ $+ 9.2654 \times 10^{-8} Z^5 - 8.2536 \times 10^{-10} Z^6 + 3.3502 \times 10^{-12} Z^7 - 4.7424 \times 10^{-15} Z^8$
A	$1.5945 \times 10^{-4} Z^2 - 1.1192 \times 10^{-5} Z^3 + 4.5928 \times 10^{-7} Z^4 - 1.1263 \times 10^{-8} Z^5$ $+ 1.6336 \times 10^{-10} Z^6 - 1.3410 \times 10^{-12} Z^7 + 5.6751 \times 10^{-15} Z^8 - 9.1077 \times 10^{-18} Z^9$

A definição da forma obtida caracteriza-se pela evolução dos parâmetros p_z , a_z , e_0 e A com a profundidade, os quais estão representados na figura seguinte. Conclui-se que a consola de fecho apresenta uma espessura máxima de 29.8 metros, sendo de 27.0 metros a sua espessura na base. Importa também referir que as espessuras máximas verificam-se na inserção dos arcos nas encostas, assumindo os valores de 39.3 metros na margem esquerda e 38.6 metros na margem direita.

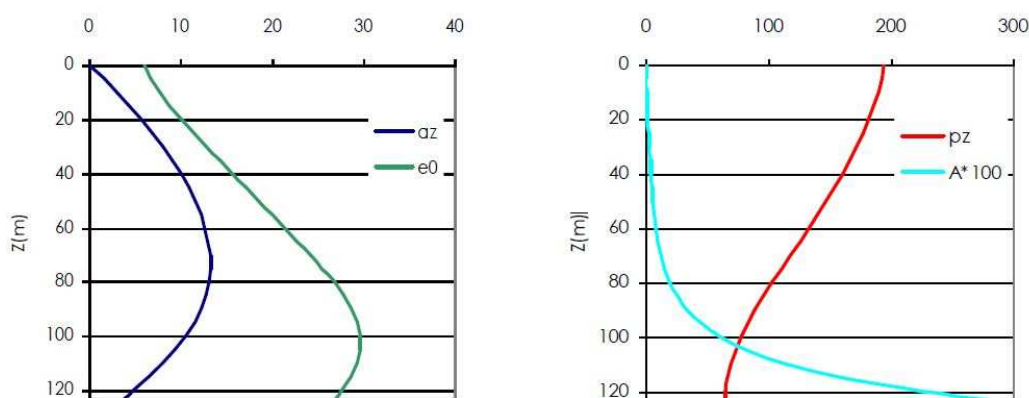


Fig.4.2 – Evolução das leis definidoras da geometria (EDP)

A barragem possui 6 galerias de visita espaçadas de 20 metros na vertical e um conjunto de 32 juntas de contração afastadas de cerca de 15.4 metros na margem direita, 15.7 metros na margem esquerda e 17 metros na zona central onde se encontra o descarregador. As juntas definem planos verticais radiais à diretriz do arco de coroamento – cota 0 no sistema de eixos utilizados – sendo que as juntas após serem injetadas com caldas de cimento, garantem o monolitismo da abóbada.

4.2.2. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA – CICLO MATLAB

Devido à quantidade de pontos necessários à modelação de uma barragem foi necessário criar um ciclo capaz de definir, a partir de equações matemáticas, os pontos necessários para a criação de um modelo tridimensional a usar no *software* DIANA.

A dificuldade do problema surge quando é necessário encontrar o ponto da linha média de cada arco, a que está associado o ponto do paramento de montante e jusante de cada junta. Isto deve-se ao facto de apenas podermos marcar a espessura da barragem na direcção de uma reta perpendicular à diretriz do arco em cada ponto, como já havia sido constatado anteriormente. Foi necessário criar um processo iterativo que, através da projecção de conjunto de pontos iniciais, nos fornecesse todos os pontos, tanto no paramento de montante como de jusante, das diversas juntas.

O seguinte programa elaborado em MATLAB, permitiu uma rápida convergência dos diferentes ciclos, obtendo-se assim, matrizes com todos os pontos de junta da barragem, pontos estes que delimitam os diferentes blocos da barragem.

A partir da seguinte imagem pode-se perceber quais as etapas do ciclo, estabelecendo como critério de paragem um valor estabelecido, que neste caso era uma distância entre dois pontos obtidos em ciclos consecutivos de iteração que teria que ser inferior a 1 mm.

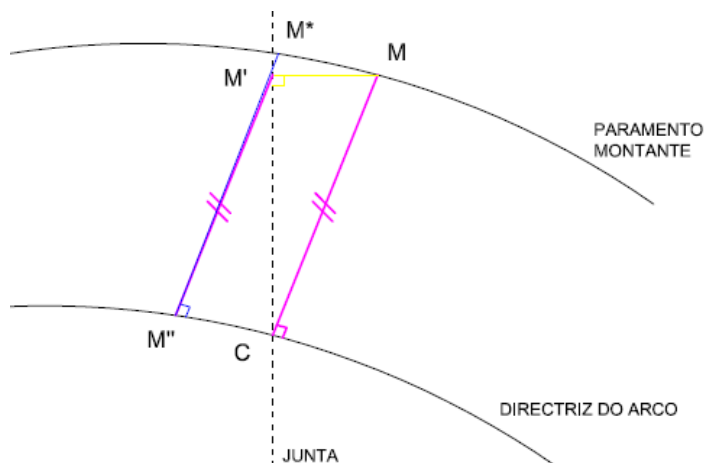
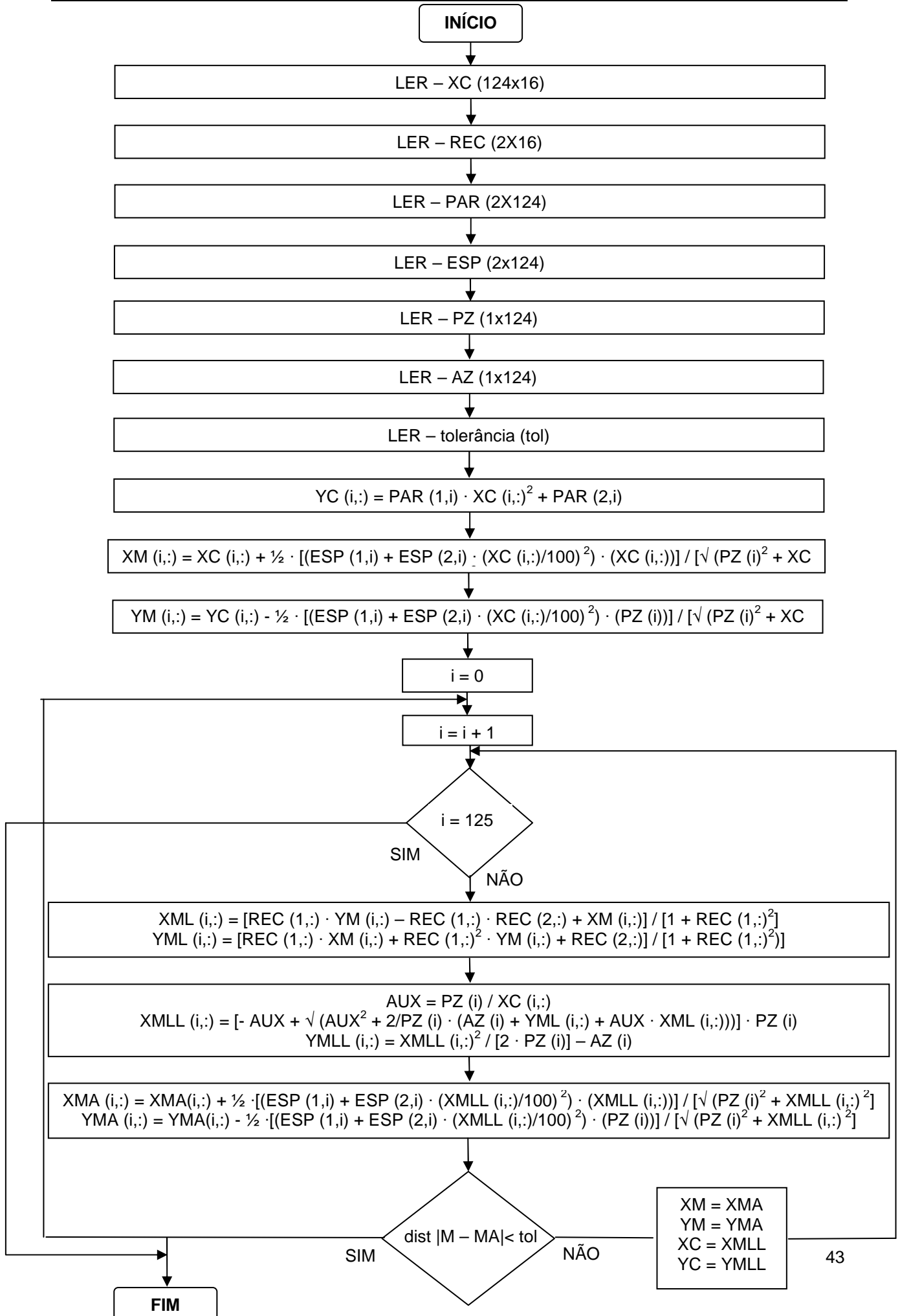


Fig.4.3 – Ciclo de definição da geometria da barragem

Os pontos C's foram obtidos em Excel, intersectando os planos das juntas com as diferentes diretrizes dos arcos, sendo portanto pontos de INPUT do programa. O fluxograma seguinte representa o ciclo criado em MATLAB. As variáveis criadas ao longo do programa estão representadas na figura anterior.

Facilmente se constata que o ciclo se inicia no ponto C, sendo que este terá que ser utilizado duas vezes: uma para definir os pontos do paramento de montante e outra para os pontos do paramento de jusante. Quando, a partir do ponto C e na direcção perpendicular à diretriz do arco numa determinada cota, se marca metade da espessura obtém-se o M. Projetando o ponto M no plano da junta determina-se o ponto M' (ML). Fazendo passar uma reta paralela a CM pelo ponto M' e intersectando-a com a diretriz do arco, obtém-se o ponto M'' (MLL). Utilizando o mesmo método usado para obter o ponto M, mas desta vez a partir do ponto M'' define-se o ponto M* (MA). Calcula-se a distância entre os pontos M* e o M e compara-se esse valor com uma determinada tolerância, que no nosso caso se admitiu ser de 1 milímetro. Se a distância for superior à tolerância o ciclo inicia-se novamente. Se for inferior passa para a próxima junta. Este ciclo é realizado para todas as juntas nas diferentes cotas, obtendo-se, assim, a geometria da barragem.



As seguintes imagens correspondem à representação em AUTOCAD dos pontos da barragem obtidos através do programa, vista em alçado, vista geral e em planta da barragem, respetivamente.



Fig.4.4 – Vista em Alçado da Barragem

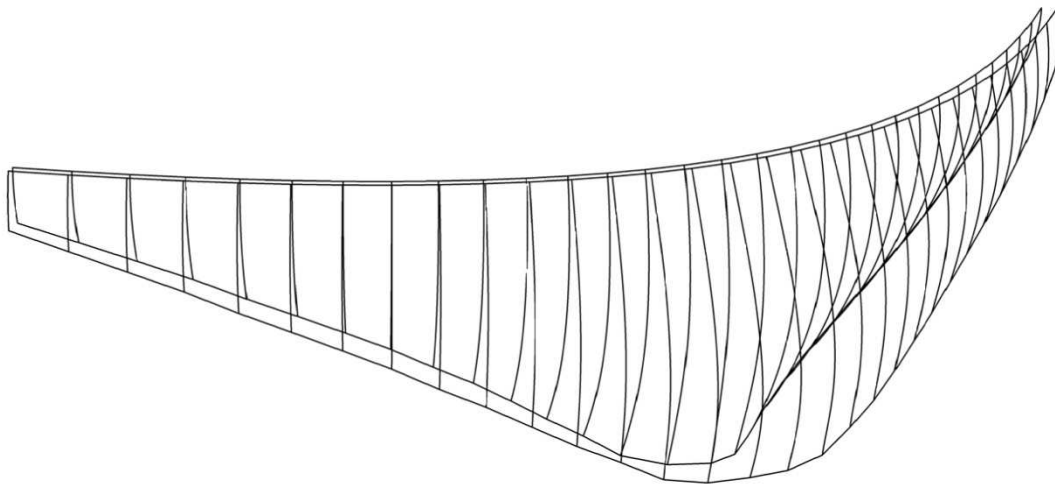


Fig.4.5 – Vista Geral da Barragem

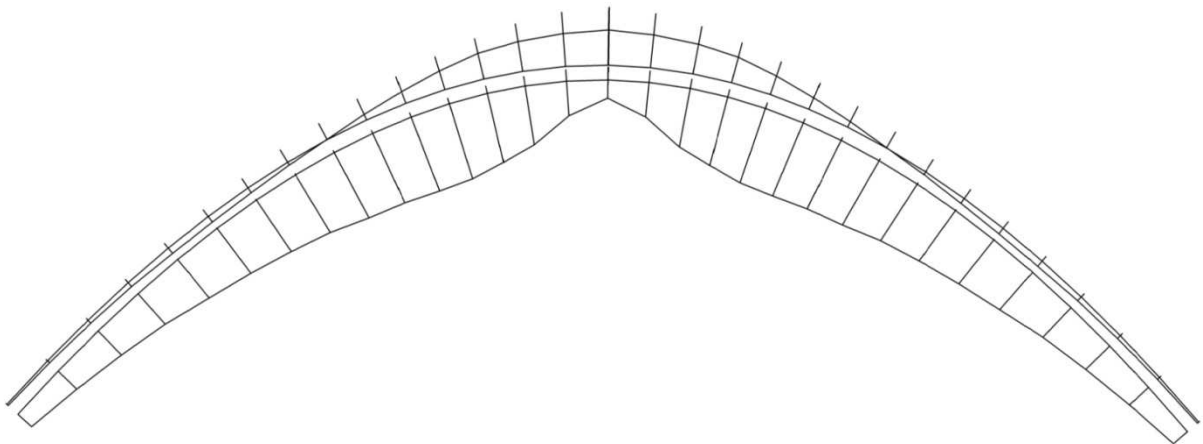


Fig.4.6 – Vista em Planta da Barragem

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

4.3.1. TIPOS DE BETÃO A APLICAR AOS ELEMENTOS DA BARRAGEM

A seguinte figura representa um corte transversal da barragem, na qual estão representados os diferentes betões que vão ser utilizados na sua construção. Facilmente se constata que o betão mais utilizado é o betão do núcleo e dos paramentos caracterizado pela classe C16/20. Contudo, apesar da resistência ser igual, existem variantes na composição do betão relacionadas com as diferentes exigências de desempenho.

A fundação e os paramentos, por estarem mais expostos ao contacto com água e a ambientes mais adversos, necessitam de maior impermeabilidade, pelo que o betão será constituído por agregados de menor dimensão, bem como de maior quantidade de ligante.

No núcleo será utilizado um betão do tipo 150.200.50, ou seja, a dimensão máxima dos agregados é 150 mm, o betão possui 200 Kg de ligante, constituída por uma mistura de cimento CEM I 42.5 R e cinzas volantes sílico aluminosas, nas proporções 50% + 50%. No paramento, ao longo de uma espessura de aproximadamente um metro e meio utilizar-se-á um betão mais rico do tipo, 75.240.50.

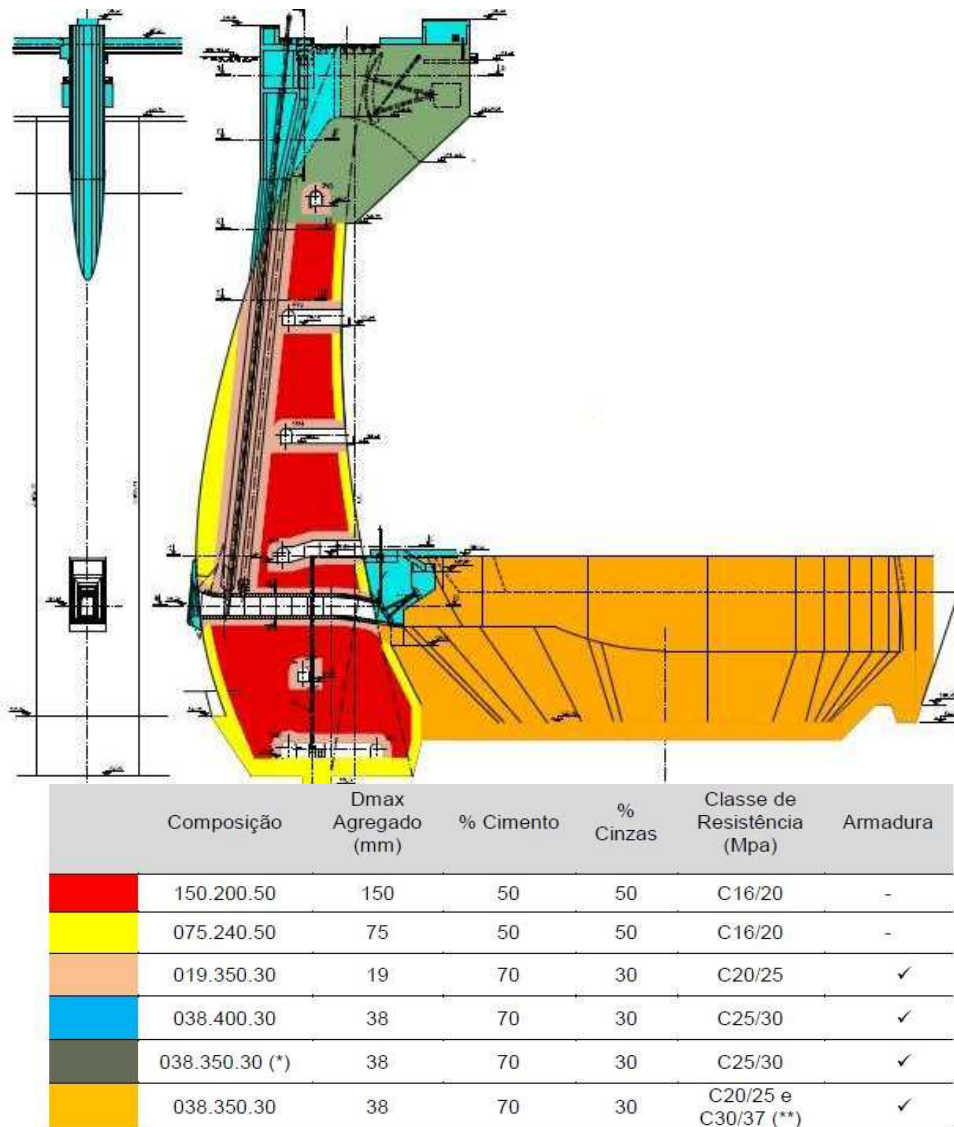


Fig.4.7 – Tipos de betão a aplicar nos diferentes elementos da barragem – corte transversal (Sousa, 2011)

Apesar de a barragem ser definida por diferentes tipos de betão, nos cálculos que serão efetuados no seguimento desta dissertação considerar-se-á que toda a barragem é constituída pelo betão de núcleo. Esta simplificação apesar de não ser conservativa, na medida em que o betão utilizado é o que possui menor quantidade de cimento, logo o que liberta menor quantidade de calor devido à hidratação deste. Importa referir que o betão definido como constituinte de toda a barragem dos betões utilizados é o que possui menor classe de resistência, diminuindo assim os erros introduzidos no modelo.

4.3.2. TEMPERATURA EM REGIME ADIABÁTICO

A libertação do calor produzido pela hidratação do ligante do betão de núcleo definido anteriormente pode ser descrita pela seguinte lei:

$$Q = \sum_{i=1}^2 A_i (1 - e^{-\alpha_i \Delta t})$$

$$A_1 = 4043.61 \text{ Kcal} \quad e \quad \alpha_1 = 0.054$$

$$A_2 = 8986.89 \text{ Kcal} \quad e \quad \alpha_2 = 0.703$$

(Equação 4.3)

O calor libertado, Q , é expresso em Kcal/m^3 de betão. Esta lei foi obtida por ajuste numérico dos resultados experimentais da mistura de ligante prevista, nas idades de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 28 e 90 dias, utilizando o método dos mínimos quadrados. A esta lei corresponde uma subida máxima teórica da temperatura do betão, em regime adiabático, de 24.9°C . Na expressão, Δt representa a idade do betão em dias.

É ainda espectável um calor potencial, $Q(\Delta t \rightarrow \infty)$, de $13030.50 \text{ Kcal/m}^3$ de betão ou 271.95 KJ/Kg de ligante. (EDP, 2007)

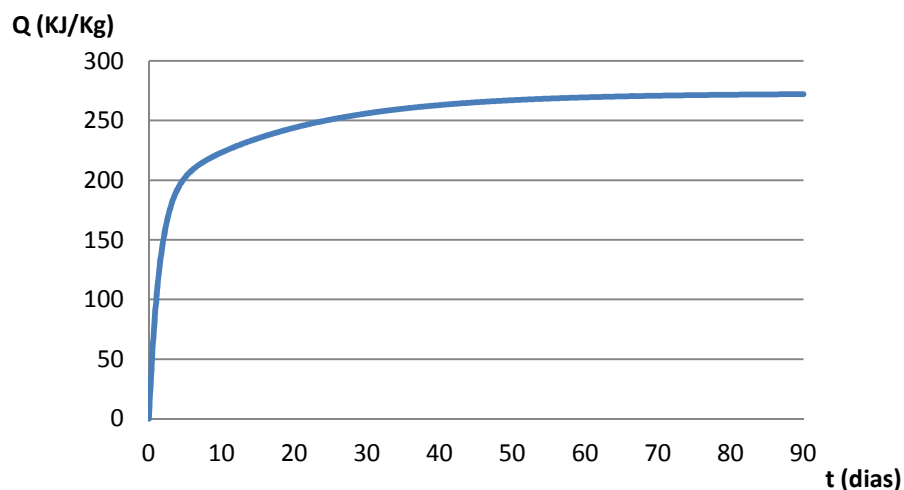


Fig.4.8 – Calor Libertado Acumulado devido à hidratação do cimento

4.4 MODELO

4.4.1. GEOMETRIA

Após terem sido determinados todos os pontos que definem a geometria da barragem, como se descreveu anteriormente, foi possível criar o modelo tridimensional da estrutura. A necessidade de usar a geometria real da barragem em vez de camadas de formas mais simples deve-se ao facto, de na análise mecânica as tensões serem bastante influenciadas pela forma da barragem, o que não acontece no modelo térmico.

Como tal, e visto ser necessário criar dois modelos para existir um termo de comparação, criou-se o primeiro modelo representativo do plano de betonagem da barragem, apresentado pelo empreiteiro em fase de concurso à EDP e um segundo modelo, baseado neste primeiro aumentando a espessura das camadas de betonagem, acelerando assim, o processo construtivo.

Geometricamente os dois modelos são exatamente iguais, diferindo apenas o número de camadas associadas em cada fase do processo construtivo, como se poderá verificar seguidamente. Devido à grande quantidade de informação que é necessário utilizar, bem como de todas as propriedades de todos os constituintes de cada fase, optou-se por formular apenas 3 blocos e meio, sendo que metade do primeiro bloco se encontra em condições adiabáticas e, assumindo a barragem como simétrica, o nosso modelo é equivalente a um modelo de 7 blocos.

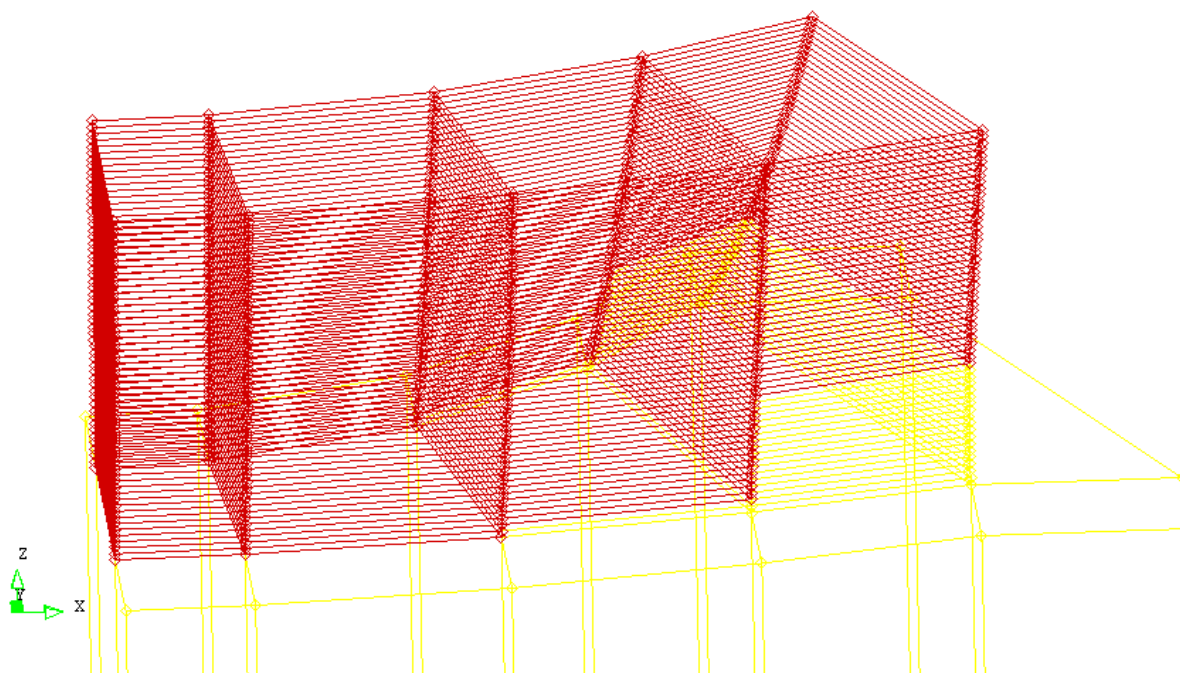


Fig.4.9 – Modelo Tridimensional da barragem

Na figura anterior estão representados a vermelho as diferentes camadas de betonagem, que irão ser agrupadas em fases, simulando assim o processo construtivo da barragem. Por outro lado, a amarelo está representado o maciço de fundação, que tem dimensões suficientes para não influenciar o estado térmico da barragem.

A espessura das camadas de betonagem vai aumentando à medida que nos vamos afastando da fundação. Nos dois modelos, esta toma o valor inicial de meio metro, atingindo um máximo de 2 metros no modelo que representa a obra realizada e 4 metros no modelo alternativo.

4.4.2. PROCESSO CONSTRUTIVO

O facto dos esforços mais relevantes se desenvolverem no terço inferior da barragem fez com que se considerasse suficiente a altura de aproximadamente 30 metros a partir da fundação como limite superior do nosso modelo. Também é possível constatar que a esta cota o primeiro bloco atinge a descarga de fundo, zona de complexa construção, devido aos equipamentos mecânicos que aí têm de ser alojados.

No primeiro modelo, definido com base no projeto, estipularam-se 44 fases, enquanto no segundo, devido ao aumento da espessura das camadas de betonagem e consequente ritmo de construção, apenas se criaram 29 fases. O termo fase corresponde ao intervalo de tempo definido entre a colação de uma camada num determinado bloco e a colocação da camada seguinte no mesmo ou noutro bloco. A sua duração pode variar tendo dimensão temporal mínima de um dia e máxima de 8 dias.

É igualmente importante referir que esta alteração da espessura das camadas de betonagem neste pequeno modelo introduziu uma redução do tempo de construção de quase 2 meses, sendo, desta forma, possível apercebermo-nos das vantagens desta alteração quando aplicada numa parte significativa da barragem.

Os tempos de betonagem de cada fase no primeiro modelo são os definidos no plano de betonagem já referido. Como tal, a criação do segundo modelo baseou-se no anterior, não alterando o processo construtivo associado.

A definição dos intervalos de tempo para a realização de uma fase vai variando. Nos dois primeiros dias após a betonagem optou-se por incrementos reduzidos, nomeadamente de 1 hora. A partir do terceiro dia até ao sexto dia utilizou-se um intervalo ligeiramente maior, 6 horas. E, por último, para mais de 6 dias adotou-se intervalos de 12 horas. Esta simplificação reduziu bastante o modelo, tornando o seu processamento mais breve. Conclui-se que esta alteração não introduz erros significativos no modelo, na medida em que o calor libertado pela hidratação do cimento ocorre nas primeiras horas após a colocação do betão, coincidindo, assim, com o instante em que a dimensão dos intervalos é mais reduzida.

O princípio básico de uma análise faseada consiste em considerar como condições iniciais da fase seguinte, os resultados da análise anterior, como extensões, temperaturas, maturação, entre outros. É necessário definir para cada fase quais os elementos ativos e qual a duração da mesma.

Em anexo estão representados os faseamentos construtivos utilizados nos dois modelos, sendo descritos o número da fase, a espessura e cota da camada a ser betonada, bem como o dia e mês da betonagem. Também o ficheiro fornecido pela EDP está representado em anexo, definindo cotas e datas de betonagem de projeto. Importa referir que os nossos faseamentos apenas se referem aos 4 primeiros blocos da barragem, enquanto o ficheiro de dados é referente à construção de toda a barragem.

4.4.3. MALHA

Utilizou-se o Método dos Elementos Finitos na composição da malha que define a estrutura, tendo sido escolhido o elemento de 20 nós para a análise mecânica e o elemento de ordem inferior, composto por 8 nós, para a análise térmica.

Para ser possível considerar a evolução da espessura das camadas de betonagem até ao seu valor máximo, optou-se por se dividir cada bloco de meio em meio metro na vertical. A divisão nas duas direções horizontais foi de 4 divisões por bloco.

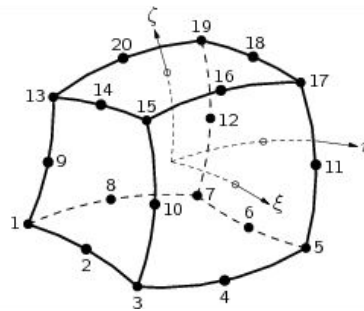


Fig.4.10 – Elemento de 20 nós – Elemento Mecânico

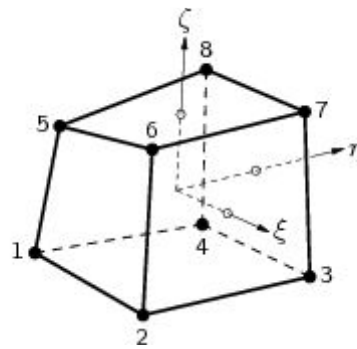


Fig.4.11 – Elemento de 8 nós – Elemento Térmico

Para representar os fenómenos de convecção no modelo térmico, foram utilizados elementos retangulares de 4 nós aplicados nas superfícies expostas ao ar ou com cofragem, criando um coeficiente de convecção fictício.

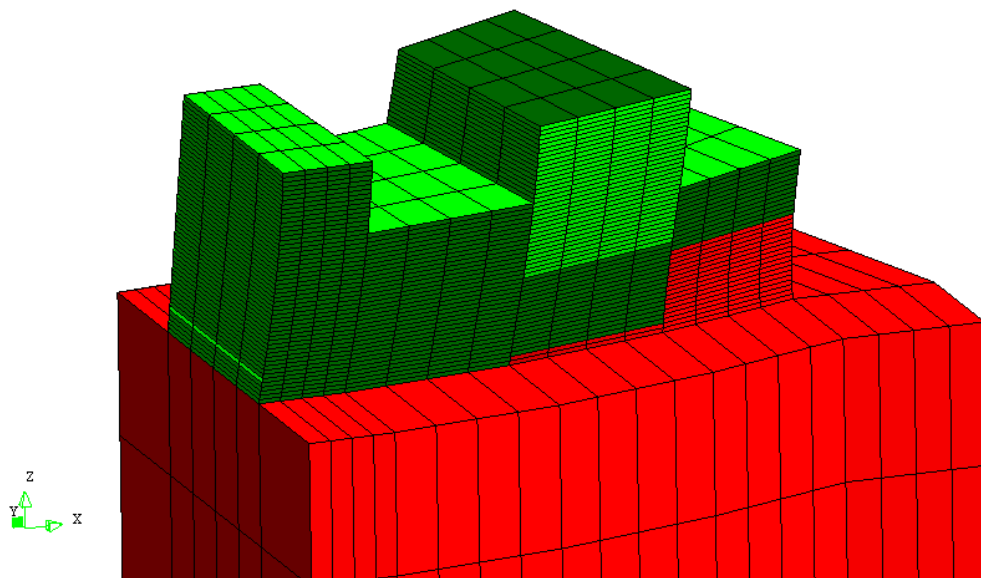


Fig.4.12 – Malha de elementos finitos utilizada (última fase modelo de 4 metros)

4.4.4. APOIOS

A localização e a direção dos apoios condicionam fortemente a distribuição dos esforços ao longo da estrutura. Deve garantir-se o equilíbrio estático da estrutura, tentando traduzir de forma mais realista possível as restrições existentes.

A definição das cotas de fundação da barragem foi fixada por forma a garantir, por um lado, um bom encastramento da barragem na fundação e, por outro, que o contacto da superestrutura com a fundação se fizesse a profundidades abaixo da zona de descompressão e alterações superficiais.

No nosso modelo, considerou-se que a fundação suporta todos os carregamentos da estrutura, sendo assim, encastrada nos seus limites. Devido às condições de simetria é também necessário utilizar apoios horizontais na superfície da esquerda do 1º bloco.

4.5 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

4.5.1. CARACTERÍSTICAS DO BETÃO

4.5.1.1. Geração de Calor

Apesar de, como se viu no subcapítulo 4.3, a barragem não ser constituída unicamente por um tipo de betão, considerou-se que apenas o betão do núcleo iria ser utilizado nos nossos modelos.

Como se referiu anteriormente, o betão utilizado é do tipo 150.200.50, constituído por uma mistura de cimento CEM I 42.5 R e cinzas volantes sílico aluminosas, nas proporções 50% + 50%. O calor libertado foi introduzido no programa através da seguinte curva adiabática de temperaturas, definindo apenas como constante de Arrhenius (E_a/R) o valor de 5000 K, valor que aproxima com rigor a curva pretendida. Este valor foi estimado a partir de ensaios “*Derivate of the Speed Method*”, para um betão constituído pelo mesmo tipo de cimento contido no estudo (Azenha, 2009).

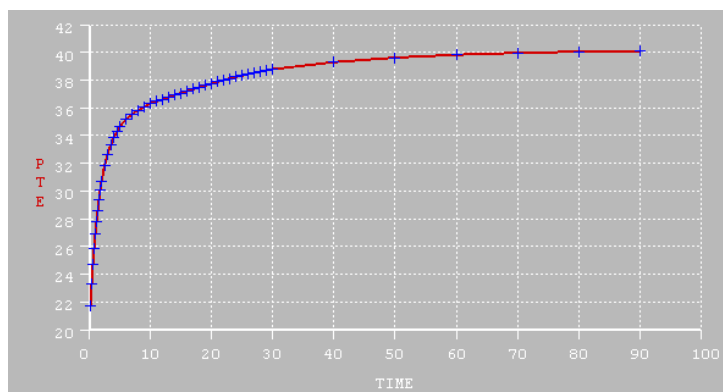


Fig.4.13 – Curva adiabática do betão do modelo

4.5.1.2. Transmissão de Calor

Definiu-se como características que descrevem a forma como se propaga o calor gerado devido à hidratação do cimento, o calor específico igual a $2400 \text{ kJm}^3\text{K}^{-1}$ e a condutibilidade térmica igual a $2.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Estes valores foram retirados de (Silveira, 1996) para betões com inertes de granito.

Foi definido para as superfícies fronteira um coeficiente de convecção/radiação que combina os efeitos das trocas de calor devido à convecção forçada e livre, bem como da radiação. A forma como o

coeficiente de convecção é formulado varia bastante com o autor, como se consegue verificar na seguinte figura.

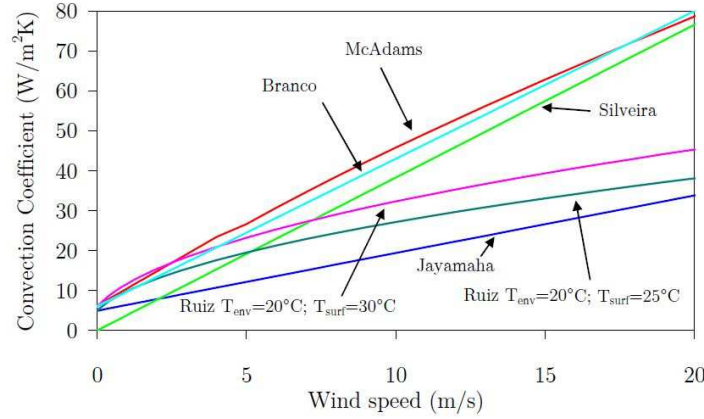


Fig.4.14 – Coeficiente de convecção em função da velocidade do vento (Azenha, 2009)

Segundo Branco (1992), o coeficiente de transferência de calor por radiação de ondas de elevado comprimento de onda é de $5.2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ para uma temperatura ambiente de 20°C .

Como a velocidade do vento não é constante durante a construção e não estão disponíveis medições desta para a zona em questão, optou-se por definir uma velocidade média anual do vento constante de 10 Km/h , equivalente a aproximadamente 2.75 m/s . Recorrendo à figura anterior e para a velocidade estipulada, pode concluir-se que o coeficiente de convecção é aproximadamente $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Logo, o coeficiente de convecção/radiação adotado para as superfícies laterais é de $15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Contudo, nos primeiros dias após a betonagem e devido à presença das cofragens, este coeficiente tem que ser reduzido. Efetivamente, existe primeiramente um fenómeno de condução de calor para a cofragem e depois a convecção entre a cofragem e o ar. Define-se, assim, o coeficiente de transferência de energia térmica equivalente, h_{eq} , determinado com base na analogia da resistência elétrica.

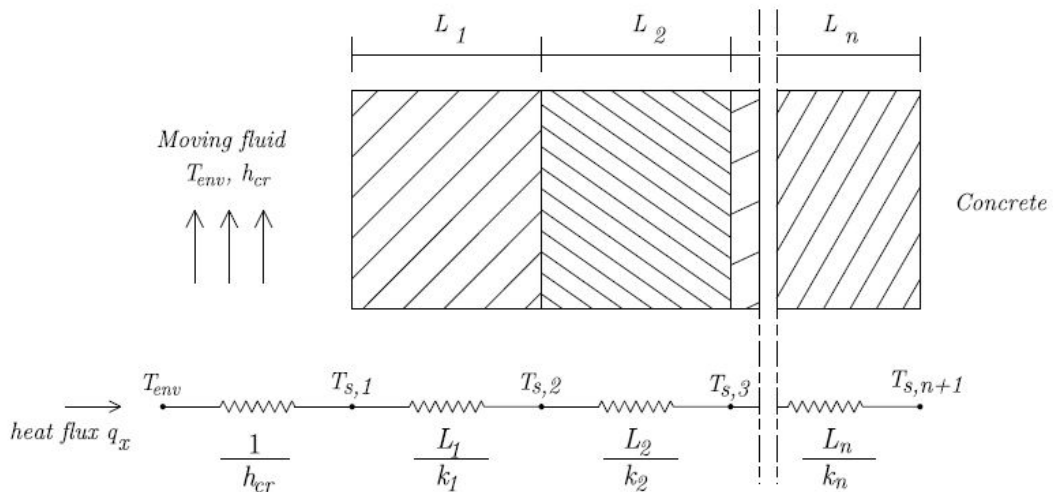


Fig.4.15 – Analogia entre a resistência elétrica e a transferência de calor nas superfícies fronteiria (Azenha, 2009)

$$h_{eq} = \left[\frac{1}{h_{cr}} + \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i} \right]^{-1}$$

(Equação 4.4)

O coeficiente adotado para o nosso estudo foi retirado de estudos semelhantes efetuados pelos LABEST, tendo-se assumido o valor de $5.4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Para as superfícies de topo e devido tanto ao isolamento utilizado para diminuir os gradientes térmicos, lâ de vidro, bem como devido ao efeito mais agravado da radiação por se tratar de uma superfície horizontal, optou-se por utilizar um coeficiente de convecção intermédio entre os dois valores anteriores. Definiu-se, assim, como coeficiente de convecção das superfícies horizontais o valor de $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

4.5.1.3. Temperatura de Colocação do Betão

A previsão da temperatura de colocação do betão depende de diversos factores. Deve referir-se que este estudo parte de estimativas e possui bastantes simplificações. Primeiro, a temperatura dos agregados e do ligante é considerada igual à temperatura média do ar, o que não é completamente verdadeiro, na medida em que estes são usualmente guardados em pilhas a céu aberto e mais tarde transportados para silos devidamente resguardados e pintados de branco para reflexão da radiação. Segundo, a temperatura da água de amassadura é retirada do rio, sendo, em certas alturas do ano, parcialmente substituída por água refrigerada e algumas vezes por gelo. Terceiro, para atender ao efeito intradiário da incidência da radiação solar e da variação da temperatura do ar no Verão, durante o transporte e colocação, considera-se um agravamento de 2°C da temperatura do betão fresco.

O seguinte gráfico representa a evolução da temperatura de colocação do betão ao longo do ano. Devido a um problema de programação foi impossível introduzir em cada fase de betonagem a temperatura de colocação do betão correspondente. Introduziu-se, por isso, uma temperatura ligeiramente superior à média para não afetar a análise térmica no Verão. A temperatura de colocação do betão considerada foi de 20°C .

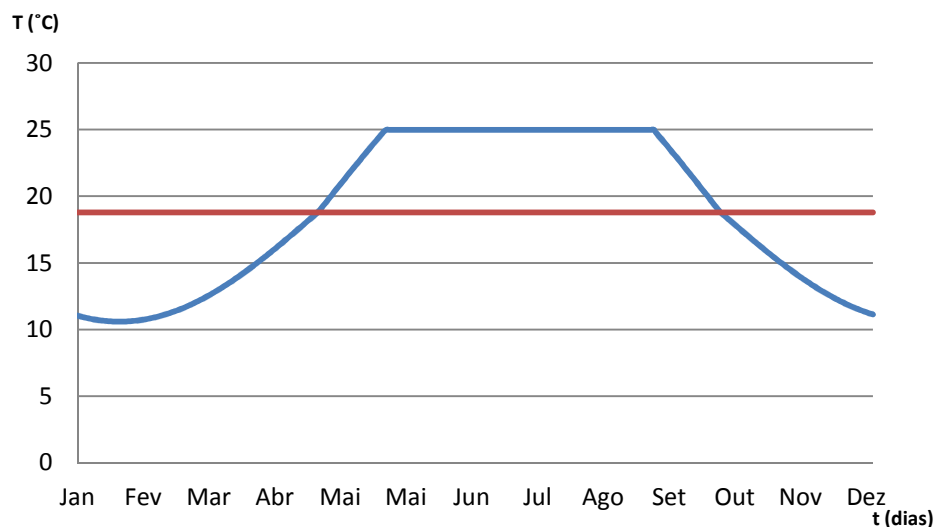


Fig.4.16 – Temperatura de colocação do betão (EDP, 2007)

4.5.1.4. Propriedades Resistentes

4.5.1.4.1. Evolução da Resistência à compressão

A tensão de rotura do betão à compressão é definida por classes de resistência relacionadas com o valor característico (quantilho de 5%) da resistência à compressão referente a provetes cilíndricos, f_{ck} , ou a provetes cúbicos, $f_{ck,cubo}$, de acordo com a EN 206-1.

O nosso betão é da classe de resistência C16/20, o que corresponde a uma resistência à compressão característica aos 28 dias de 16 MPa para provetes cilindros e 20 MPa para provetes cúbicos.

Em certos casos, como o de uma barragem, é apropriado avaliar as propriedades resistentes do betão antes ou depois de 28 dias. Para tal estimativa utilizaram-se expressões definidas no Eurocódigo 2 (EC2).

A tensão de rotura do betão à compressão numa idade t depende do tipo de cimento, da temperatura e das condições de cura. Para uma temperatura média de 20° C e uma cura de acordo com a EN 12390, a tensão de rotura à compressão em várias idades, $f_{cm}(t)$, pode ser estimada pelas seguintes expressões:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}$$

(Equação 4.5)

$$\beta_{cc} = \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right)} \right]$$

(Equação 4.6)

Nas expressões anteriores $f_{cm}(t)$ corresponde à tensão média de rotura do betão à compressão à idade t em dias, f_m a tensão de rotura aos 28 dias de idade. No caso presente $f_{cm} = 24$ MPa. Como o cimento é do tipo CEM I 42.5 R, a constante s assume o valor 0.20.

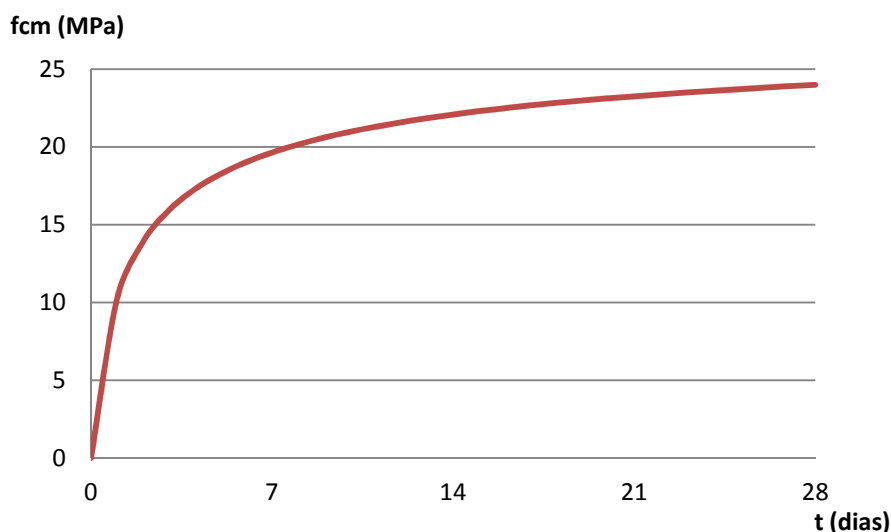


Fig.4.17 – Evolução da resistência à compressão com o tempo

4.5.1.4.2. Evolução da Resistência à tração

A evolução com o tempo da resistência à tração é fortemente influenciada pelas condições de cura e secagem e também pelas dimensões dos elementos estruturais (EC2). A seguinte função traduz a evolução da resistência à tração média com o tempo.

$$f_{ctm}(t) = [\beta_{cc}(t)]^\alpha \cdot f_{ctm}$$

(Equação 4.7)

Na expressão anterior o coeficiente β_{cc} é o mesmo que foi representado na expressão 4.11. Por outro lado, a constante α é igual a 1 se $t < 28$ dias e igual a $2/3$ para t maior ou igual a 28 dias.

A evolução da resistência à tração foi introduzida no programa através de uma função que converte a idade do betão em idade equivalente, segundo a lei de Arrhenius definida internamente pelo programa a uma temperatura de referência de 20° C.

Segundo o EC2 o valor da tensão resistente à tração média, é igual a 1.9 MPa, sendo o seu respetivo valor característico de 1.33 MPa.

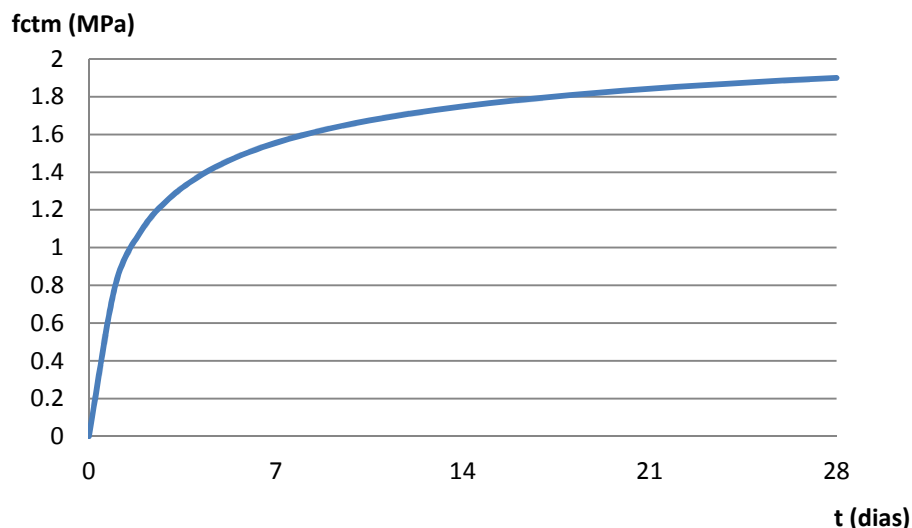


Fig.4.18 – Evolução da resistência à tração com o tempo

4.5.1.4.3. Evolução do Módulo de Elasticidade

A evolução do módulo de elasticidade com o tempo é definida através de uma relação com a evolução da resistência à compressão do betão com o tempo, como se pode constatar pela fórmula seguinte, sendo esta também retirada do EC2.

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm}$$

(Equação 4.8)

Em que $E_{cm}(t)$ e $f_{cm}(t)$ são os valores na idade de t dias, e E_{cm} e f_{cm} são os valores determinados à idade de 28 dias. Segundo o EC2, para o betão em causa definiu-se para E_{cm} o valor de 29 GPa e para f_{cm} o valor de 24 MPa.

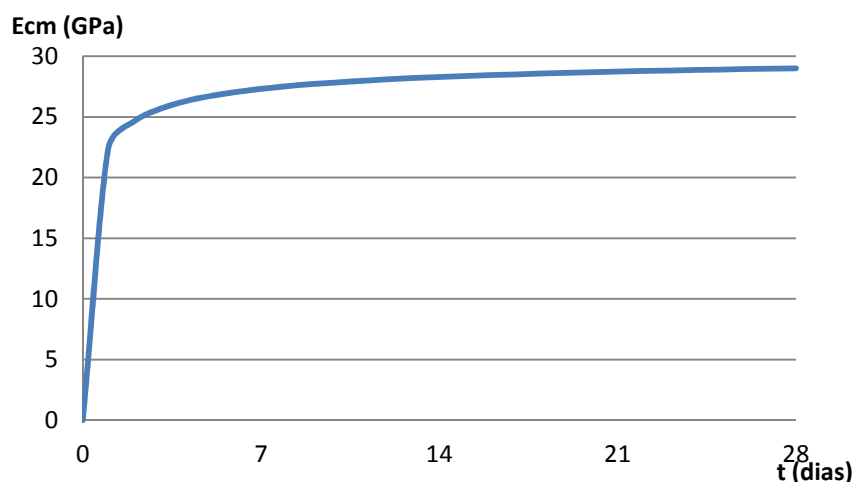


Fig.4.19 – Evolução do módulo de elasticidade com o tempo

É importante referir que no modelo de cálculo o módulo de elasticidade inicial e durante as primeiras horas foi considerado de 1 MPa, porque, caso o módulo de elasticidade fosse 0, como o peso próprio é aplicado antes da ação térmica, os deslocamentos seriam muito elevados.

Considerou-se que tanto o coeficiente de Poisson como o coeficiente de dilatação térmica são constantes ao longo de toda a análise, tendo-se adotado valores de 0.2 e 10^{-5} K^{-1} respetivamente.

4.5.1.5. Fluência

A fluência foi introduzida segundo uma Lei da Dupla Potência, tendo como parâmetros os definidos no quadro 4.4. Estes valores foram retirados de um estudo para betões com características mecânicas C16/20 semelhantes desenvolvido em (Azenha, 2009) para a barragem de Pretarouca representados no quando 4.3.

Quadro 4.3 – Coeficientes para a lei da dupla potência na Barragem de Pretarouca (Azenha, 2009)

Barragem	E_0 (GPa)	ϕ	m	n
Pretarouca	31.4	0.2246	0.2	0.3

Quadro 4.4 – Coeficientes para a lei da dupla potência utilizados no Modelo

Modelo	n	t'	ϕ	m
Projeto	0.3	6782401	0.2246	0.2
Alterado	0.3	3888001	0.2246	0.2

O valor de t' varia nos dois modelos pelo facto de, aquele valor ter que ser próximo de metade do tempo total de análise, aproximando desta forma as séries de Taylor à Lei da Dupla Potência.

4.5.1.6. Retração

Outra forma de fissuração prematura pode ocorrer quer devido à retração de secagem, quer devido à retração autogénea. Estes fenómenos fazem com que o betão contraia devido à evaporação da água da estrutura porosa. Quando estas contrações são impedidas ou restringidas desenvolvem-se tensões de tração na estrutura.

Para conseguirmos prever o desenvolvimento deste tipo de tensões é necessário criar modelos que representem o fluxo de humidade no interior da estrutura porosa do betão.

Contudo, e por estar a utilizar-se um betão de resistência normal, a retração autogénea não tem relevância porque, como se viu anteriormente, esta é significativa em betões de alto rendimento.

Devido ao curto intervalo da análise em questão, às condições de cura a que a peça está sujeita devido ao processo construtivo, à dimensão das peças e sobreposição destas, criam-se artificialmente “quartos de cura”. Por estes motivos, pode-se concluir que a retração de secagem também pode ser desprezada, não influenciando a análise.

4.5.2. CARACTERÍSTICAS DA FUNDAÇÃO

4.5.2.1. Transmissão de Calor

Como nenhuma caracterização térmica do material foi executada, considerou-se que todo o maciço era granítico, e segundo Silveira (1996) adotou-se o calor específico igual a $2040 \text{ kJm}^3\text{K}^{-1}$ e a condutibilidade térmica igual a $2.79 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Considerou-se também que a temperatura inicial do maciço de fundação é igual à temperatura média anual do ar no local 15.6°C .

4.5.1.2. Propriedades Resistentes

No modelo desenvolvido considerou-se que o maciço de fundação é homogéneo, isotrópico e sem descontinuidades. Através de estudos geológicos e geotécnicos verificou-se que a estrutura se encontra fundada predominantemente numa zona ZG1 caracterizada por um grau de alteração W1 a W2 e grau de fracturação F1 a F3. Embora os módulos de elasticidade desta zona estejam compreendidos entre 7.5 e 17.5 GPa devido ao facto de o maciço vir a ser alvo de um tratamento generalizado de consolidação e de tratamentos localizados das zonas com piores características geotécnicas pode-se adotar como módulo de elasticidade do maciço de fundação 20 GPa.

Considerou-se também que o coeficiente de Poisson é igual a 0.2 e o coeficiente de dilatação térmico $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, ambos constantes durante toda a análise.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS AÇÕES

4.6.1. PESO PRÓPRIO

O peso volúmico considerado para este betão é o geralmente utilizado em estruturas de betão, cerca de 24 kN/m^3 (2446.5 kg/m^3). Esta solicitação é aplicada de forma automática através da seleção dos corpos sujeitos a este caso de carga.

Devido às pequenas alterações que o peso próprio vai introduzir nas tensões instaladas na estrutura, e ao facto de em muitos estudos semelhantes o seu efeito desprezado, optou-se por considerar que não existe espaçamento entre as juntas. Esta simplificação é possível porque comparando a gama de tensões geradas devido à expansão térmica com as do peso próprio, as segundas quase não tem significado. Sendo assim, o peso próprio foi introduzido na estrutura partindo do suposto que as juntas já se encontram injetadas, ou seja, que a estrutura se comporta como monolítica.

4.6.2. TEMPERATURA DO AR

Para definir a temperatura no local da obra é usada uma base de dados de medições de temperatura na zona de Baixo Sabor, durante um ano, de 10 em 10 minutos. O gráfico seguinte representa a variação de temperatura modelada na nossa análise.

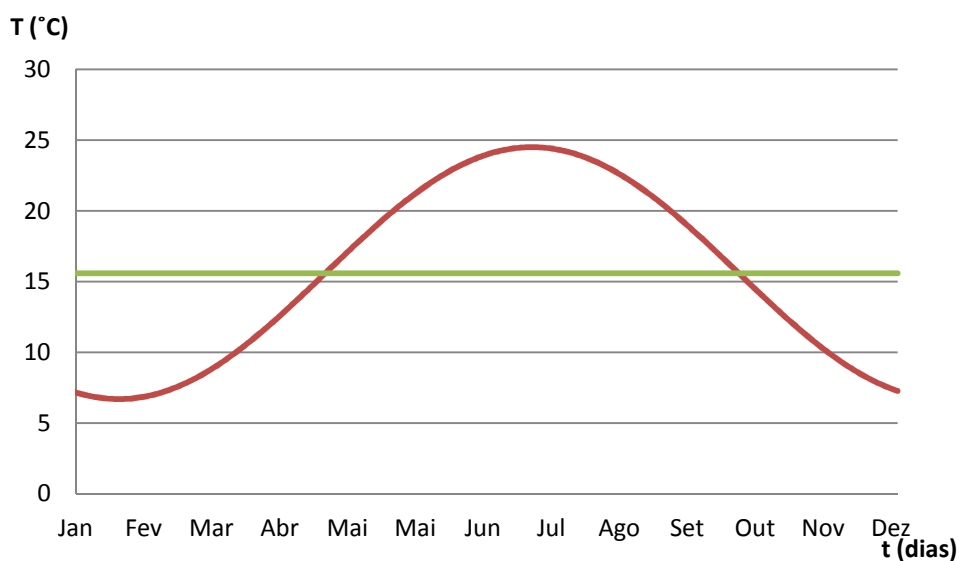


Fig.4.20 – Temperatura do ar

5

Resultados do Modelo e Discussão

5.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados dos modelos térmico e mecânico para os dois casos em estudo. Como referido anteriormente, o primeiro caso diz respeito ao processo construtivo apresentado em fase de concurso em que se adotaram camadas de betonagem com espessura máxima de 2 metros. Por outro lado, o segundo caso foi definido com base no primeiro, aumentando a espessura máxima para 4 metros.

Para mais fácil compreensão denominou-se o primeiro modelo de modelo de projeto e o segundo, como seria de prever, modelo alterado.

Devido à grande quantidade de resultados obtidos apenas são apresentados os dados mais relevantes e que permitem a comparação dos dois modelos.

5.2 RESULTADOS DO MODELO TÉRMICO

O objetivo do modelo térmico é obter os campos de temperaturas ao longo dos instantes de tempo considerados, sendo que, como se viu nos capítulos anteriores, o modelo de projeto apresenta 44 fases e o modelo alterado apenas 29.

Considerando, numa primeira fase, apenas o modelo de projeto, apresentam-se mapas de temperaturas nas respetivas fases de construção. Assinala-se que, pelo facto de o primeiro bloco apresentar simetria, por estar limitada pela consola de fecho, e a esta superfície terem sido atribuídas características adiabáticas, pode considerar-se que esta superfície é equivalente a um corte vertical da secção, representativo do núcleo da estrutura.

Na legenda do canto inferior direito é apresentada uma escala colorimétrica, correspondendo o vermelho a temperaturas mais elevadas e o azul a temperaturas inferiores.

Por outro lado, no canto superior esquerdo são descritas as temperaturas máxima e mínima, a fase e o intervalo correspondente.

A primeira imagem é referente à 10ª fase, na qual apenas se iniciou a betonagem dos três primeiros blocos. O intervalo escolhido permite que os efeitos de convecção nas superfícies fronteira conduzam ao equilíbrio térmico destas com a atmosfera, encontrando-se aqui a temperatura mínima. Por outro lado, o núcleo, por se encontrar mais afastado da superfície, o que se aproxima de condições adiabáticas atinge temperaturas mais elevadas, neste caso 32.5° C.

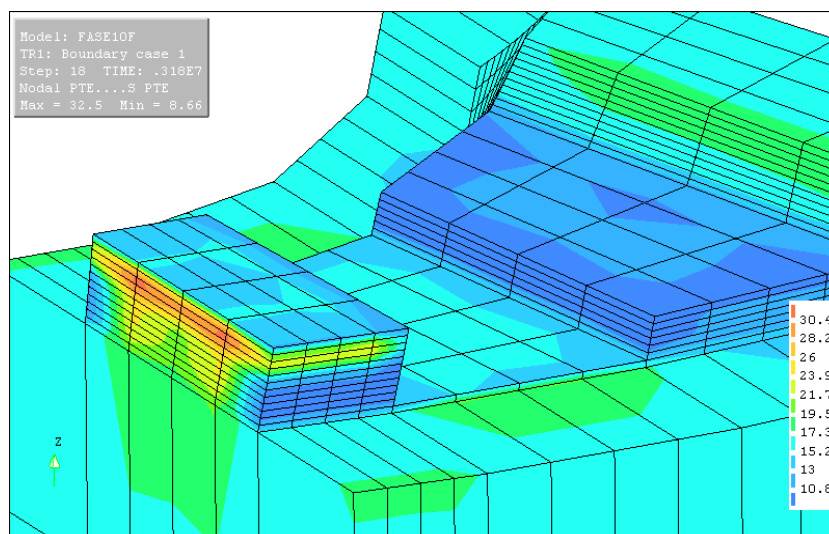


Fig.5.1 – Campo de Temperaturas do Modelo de Projeto na fase 10

Através das duas figuras seguintes, 5.2 e 5.3, é perceptível a evolução da temperatura devida à geração de calor. Inicialmente, a temperatura do novo bloco de 2 metros é de 20° C, temperatura de colocação do betão em toda o processo construtivo, sendo que à medida que a fase vai decorrendo a sua temperatura vai aumentando, atingindo o valor máximo de 33.1° C no núcleo.

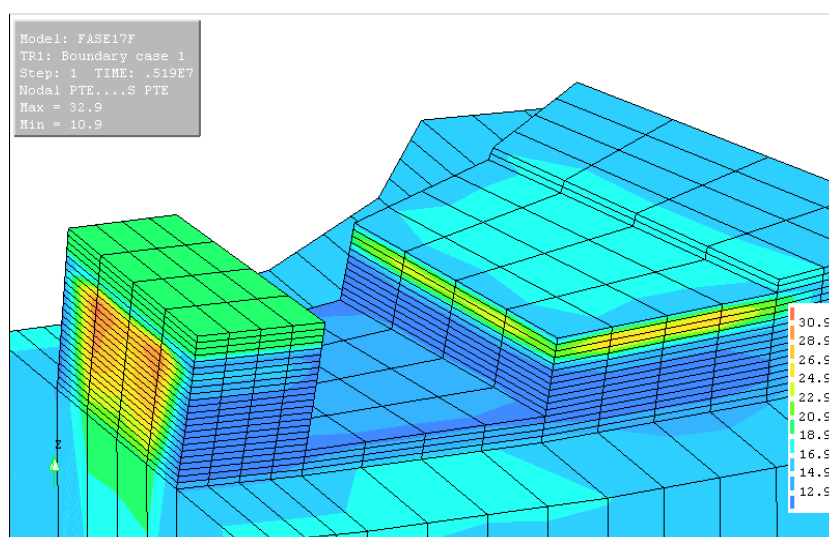


Fig.5.2 – Campo de Temperaturas do Modelo de Projeto no instante inicial da fase 17

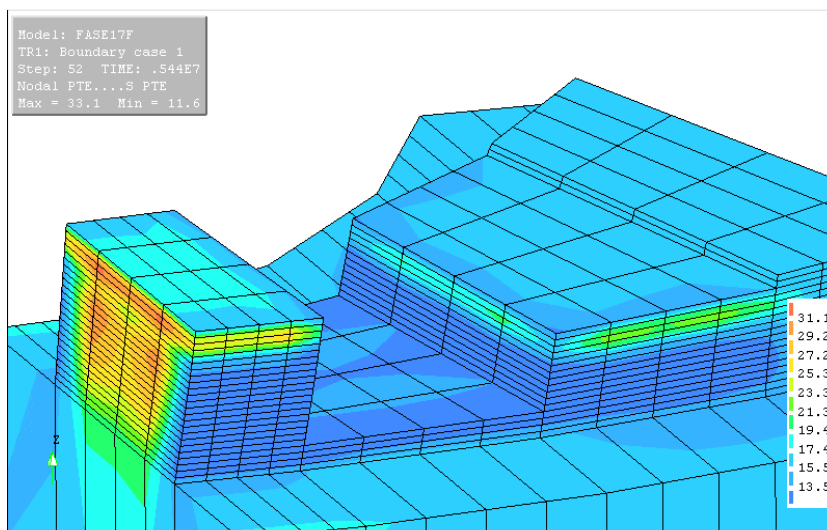


Fig.5.3 – Campo de Temperaturas do Modelo de Projeto no instante final da fase 17

A figura 5.4 refere-se a uma fase mais avançada do processo construtivo. Verifica-se que a temperatura do núcleo dos blocos vai aumentando devido à acumulação de calor, gerado pela hidratação do cimento de camadas sucessivas. Conclui-se também que as temperaturas superficiais, ou seja, as temperaturas mínimas também vão aumentando, pois passamos para uma época do ano em que a temperatura do ar é mais elevada.

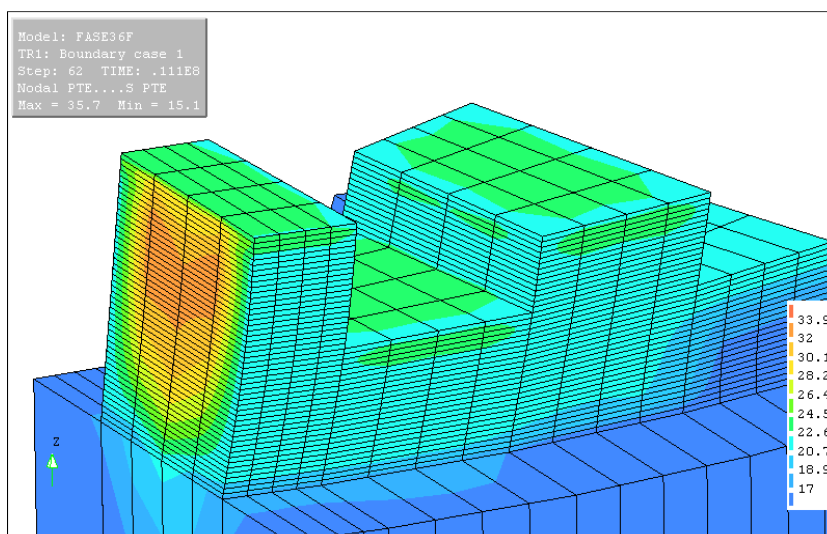


Fig.5.4 – Campo de Temperaturas do Modelo de Projeto na fase 36

As imagens que se seguem são retiradas do Modelo Alterado, modelo que envolve menos fases visto que para a mesma geometria da estrutura os blocos avançam mais rapidamente.

Através da imagem 5.5 pode-se concluir que ambos os fenómenos de transferência de calor, condução e convecção, têm a mesma influência na estrutura. Contudo, facilmente se constata que por as camadas serem mais espessas, a temperatura do núcleo é superior, atingindo temperaturas na ordem dos 37° C logo nas primeiras fases de betonagem.

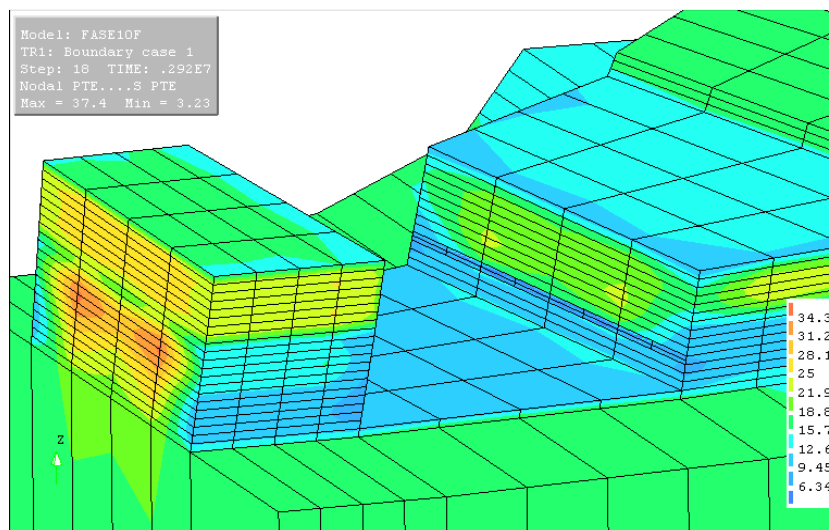


Fig.5.5 – Campo de Temperaturas do Modelo Alterado na fase 10

No seguimento das figuras anteriormente apresentadas, as figuras 5.6 e 5.7 representam a evolução do campo de temperaturas em dois instantes. A primeira imagem é referente ao instante inicial da fase 17 e a segunda ao instante final. Conclui-se que o aumento da temperatura do novo bloco é bastante superior ao verificado anteriormente, devendo-se, novamente, à variação considerável da espessura das camadas de betonagem.

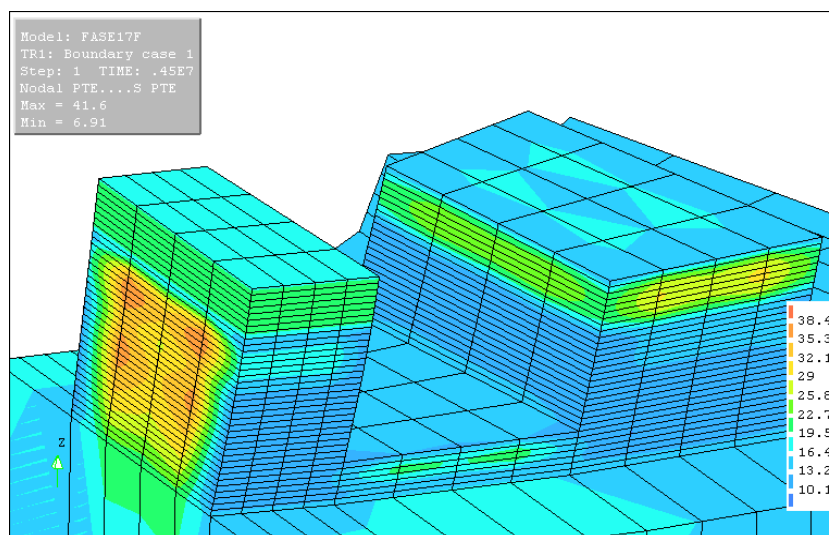


Fig.5.6 – Campo de Temperaturas do Modelo Alterado no instante inicial da fase 17

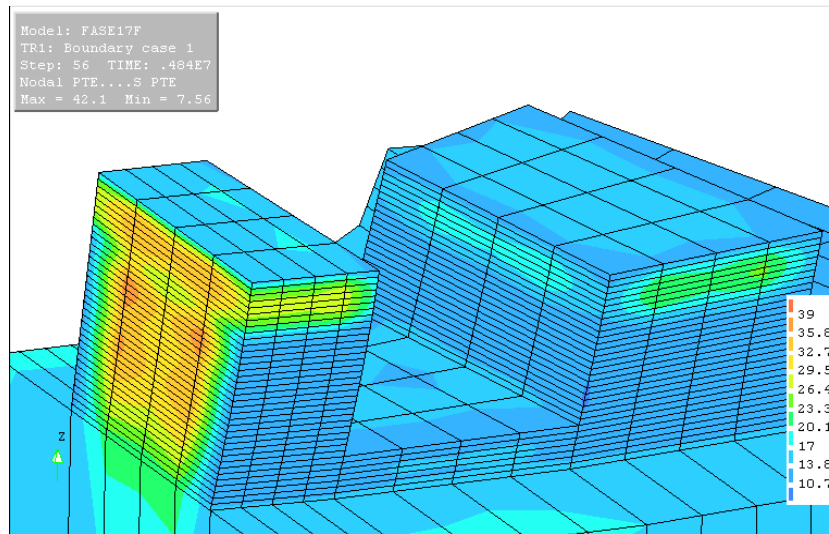


Fig.5.7 – Campo de Temperaturas do Modelo Alterado no instante final da fase 17

A última imagem que se segue, alusiva à fase 25 do Modelo Alterado, permite verificar que a gama de temperaturas obtidas no núcleo de cada bloco é bastante superior à do Modelo de Projeto, atingindo temperaturas máximas de cerca de 42.4° C, isto é 7° C acima do Modelo de Projeto.

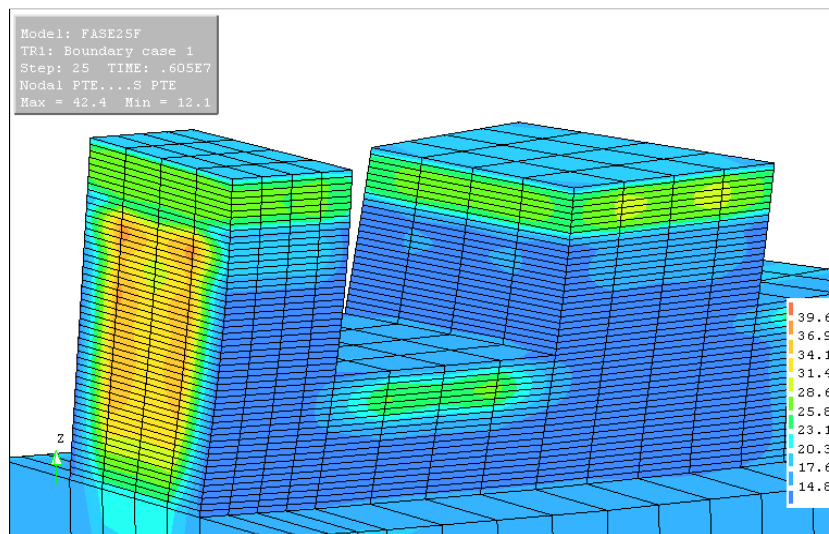


Fig.5.8 – Campo de Temperaturas do Modelo Alterado na fase 25

5.3 RESULTADOS DO MODELO MECÂNICO

A análise mecânica é elaborada não só com resultados obtidos na análise térmica, os campos de temperatura, mas também com as cargas da estrutura, o peso próprio. Os mapas de tensões obtidos são referentes à atuação dos dois casos de carga em simultâneo.

As seguintes imagens representam as tensões principais, σ_1 e σ_3 respetivamente, para um dado instante de uma fase do Modelo de Projeto. Para uma mais fácil interpretação das diferentes imagens optou-se por utilizar uma legenda constante, abrangendo tensões com valor situados entre -5 MPa e 2.5 MPa. O primeiro valor, apresentando um sinal negativo, indica tratar-se de uma compressão e está representado a azul. O segundo valor, por ser positivo, mostra tratar-se de uma tração e aparece na figura representada a vermelho.

A convenção de ordenação das tensões principais utilizadas no programa de cálculo é $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Por isso as trações máximas ocorrem em σ_1 e as compressões máximas em σ_3 .

Através da observação da primeira imagem (Fig. 5.9) é possível constatar que devido à diferença de temperaturas existente entre as camadas superficiais e o núcleo do bloco, desenvolvem-se tensões. Isto deve-se ao facto de o núcleo estar a uma temperatura mais elevada do que a periferia. A dilatação resultante é contrariada pela camada superficial do bloco que se encontra mais fria. Assim sendo, como se verifica na imagem, ainda que com pouca intensidade, irão formar-se trações nas zonas superficiais do bloco e compressões no seu núcleo, fenómeno que se irá inverter com o envelhecimento do bloco.

Nesta fase do processo construtivo as trações máximas verificadas são da ordem de 1.3 MPa. Por outro lado, verifica-se o aparecimento de compressões localizadas na intersecção do paramento de montante com a fundação. Estas devem-se à existência de um ponto angularo entre as duas superfícies. Na prática, esta situação não ocorre, visto que esta zona da barragem é betonada contra a fundação que, na realidade, é inclinada e não horizontal como representada no modelo.

A gama de compressões no resto da barragem ainda é bastante reduzida, aproximadamente 1 ou 2 MPa, valores bastante aceitáveis e coerentes com esta fase do processo construtivo.

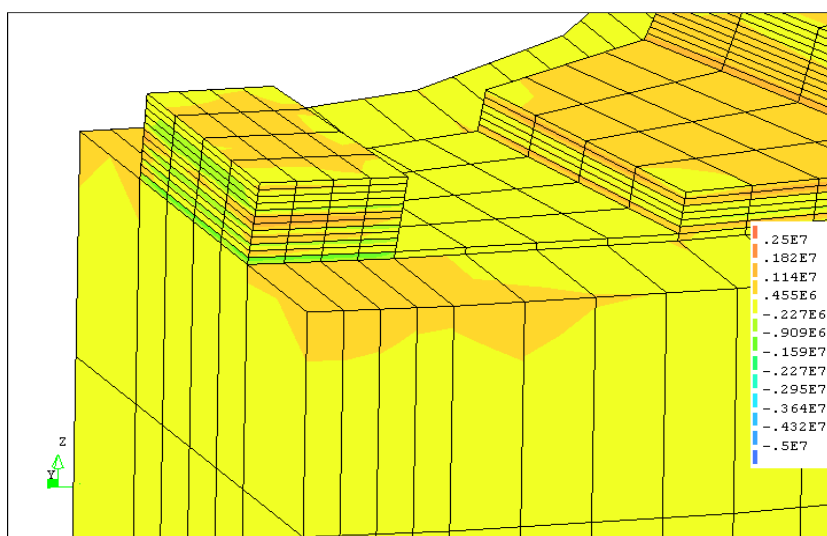


Fig.5.9 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo de Projeto na fase 10

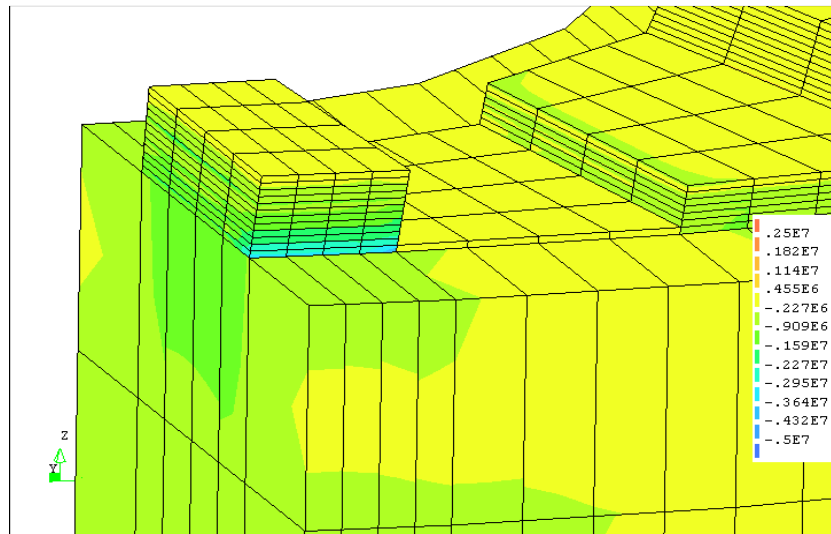


Fig.5.10 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo de Projeto na fase 10

Nas figuras 5.11 e 5.12 verifica-se o aparecimento de uma zona de trações na fundação, mas que não têm influência nas tensões da barragem. Estas trações, de valor apreciável, devem-se à restrição imposta nos apoios da estrutura, definidos em 4.5.4, que não se encontram suficientemente afastados da barragem. Contudo, numa avaliação geral do estado de tensão na barragem verifica-se que as tensões de tração geradas se situam abaixo dos 1.9 MPa, resistência à tração máxima do betão considerado.

A ligação entre a fundação e a barragem começa a apresentar tensões com valores cada vez mais elevados, surgindo compressões bastante superiores a 5 MPa. Na imagem 5.12 já é mais notória a influência do ponto angularo, verificando-se um aumento das tensões de compressão na sua vizinhança.

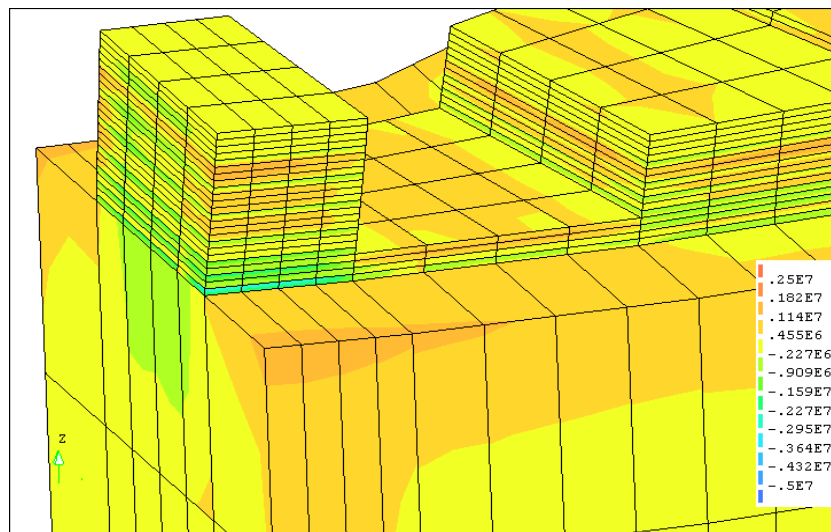


Fig.5.11 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo de Projeto na fase 17

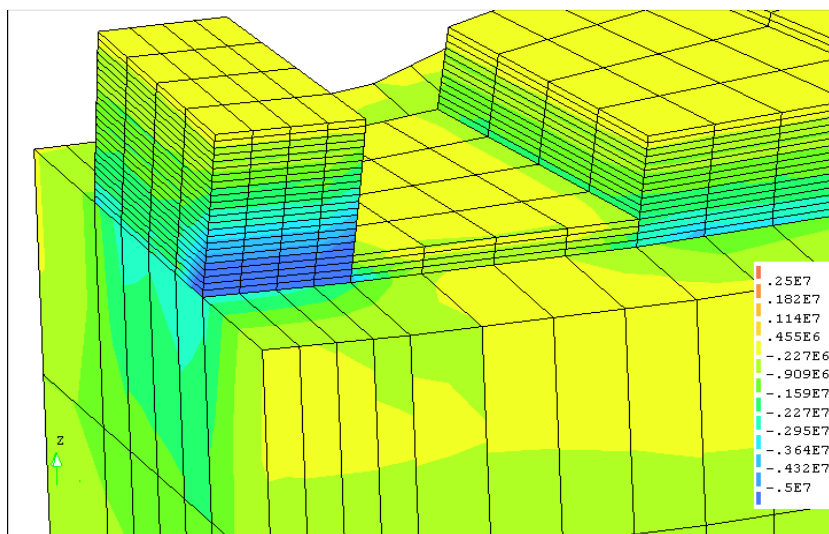


Fig.5.12 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo de Projeto na fase 17

Por último, as figuras 5.13 e 5.14 dizem respeito ao campo de tensões para a última fase de betonagem do primeiro bloco da barragem. No que toca às trações, o seu valor máximo aproxima-se do valor máximo da resistência à tração, podendo até ocorrer alguma microfissuração. Contudo, como as trações são devidas à ação térmica, a aparecimento de uma fissura leva a uma redistribuição dos esforços na sua vizinhança, o que origina a redução significativa das trações existentes. Como tal, a segurança estrutural da barragem não é afetada.

Na imagem 5.14 optou-se por uma alteração da escala que, caso não tivesse sido feita, dar-nos-ia uma estrutura quase monocromática, não sendo perceptível a variação de tensões na estrutura. Como se pode concluir a partir da interpretação da imagem, o ponto angularo gera concentrações de tensões muito significativas, que não se verificam na realidade, enquanto o resto da barragem se encontra com compressões entre 7 e 10 MPa.

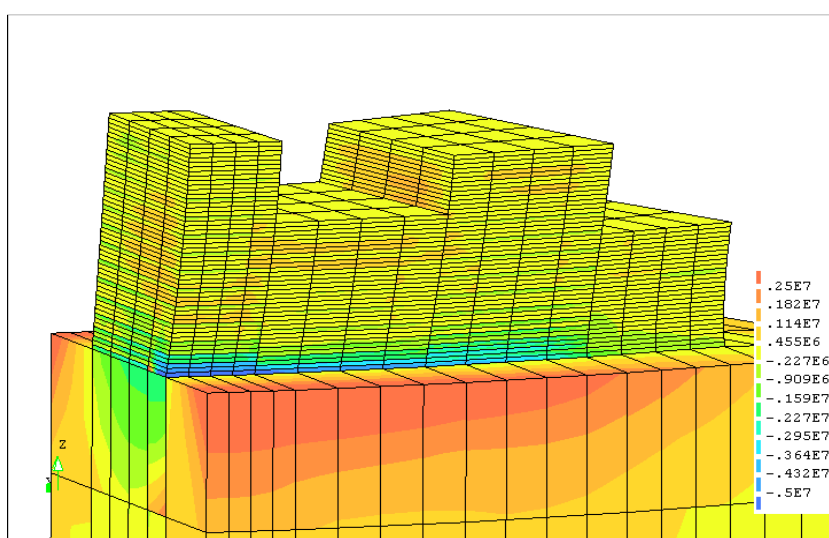


Fig.5.13 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo de Projeto na fase 42

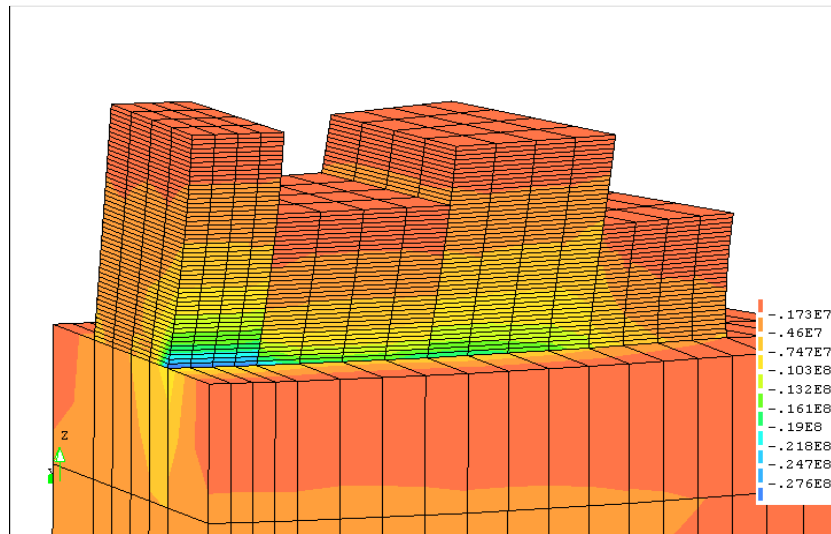


Fig.5.14 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo de Projeto na fase 42 – Escala Alterada

As imagens que vão ser apresentadas de seguida foram retiradas da análise mecânica do Modelo Alterado. Como foi feito até aqui, apresentam-se apenas as tensões principais na estrutura num determinado instante de uma fase.

Nas primeiras fases do processo construtivo do Modelo Alterado a gama de tensões assemelha-se à do Modelo de Projeto. Isto deve-se ao facto de nas primeiras fases existir um aumento gradual da espessura de betonagem até se atingir o valor máximo de 4 metros, pelo que o efeito é camuflado pelas camadas de espessura inferior. Verifica-se que as tensões máximas de tração são da ordem de 1.2 MPa. Por outro lado, não considerando o ponto angularo semelhante ao do Modelo de Projeto, de uma forma geral o valor máximo das compressões é de cerca de 2 MPa, como se consegue observar nas figuras 5.15 e 5.16.

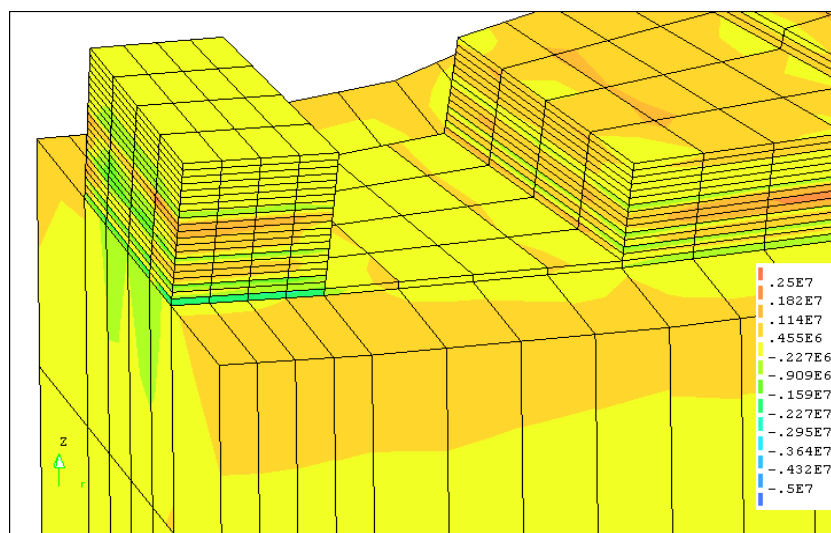


Fig.5.15 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo Alterado na fase 10

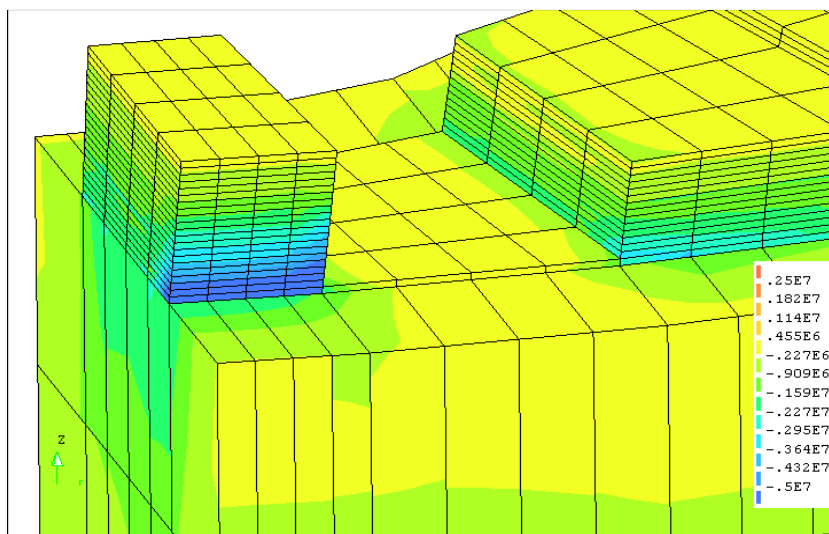


Fig.5.16 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo Alterado na fase 10

Na fase construtiva 17, apresentada nas figuras 5.17 e 5.18, já se verificam tensões de tração muito elevadas, nomeadamente de cerca de 2.5 MPa. Apesar da sua magnitude pouco ultrapassar o valor da resistência à tração de 1.9 MPa, certamente que ocorrerá fissuração. Relativamente às compressões presentes na estrutura, o ponto anguloso definido entre a fundação e a barragem volta a apresentar influência nas compressões na zona envolvente, como também se verificou no Modelo de Projeto. Contudo, de uma forma geral, as compressões na barragem situam-se num intervalo de 3 a 4 MPa, valores bastante razoáveis para o processo construtivo em causa.

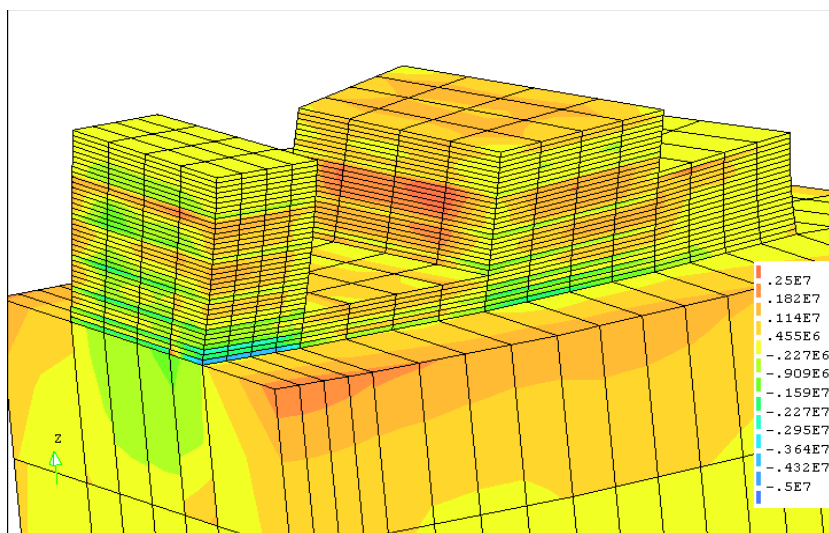


Fig.5.17 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo Alterado na fase 17

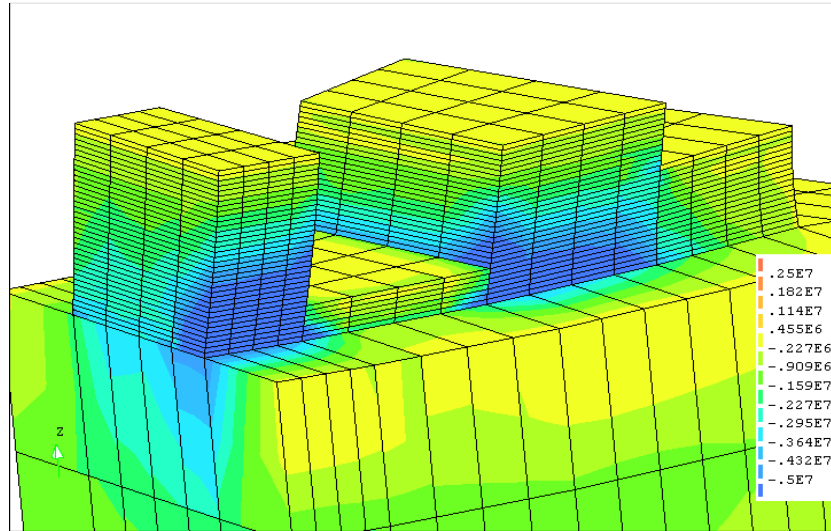


Fig.5.18 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo Alterado na fase 17

As últimas duas figuras apresentadas seguidamente, referem-se à fase 25 do Modelo Alterado. Através destas, é possível concluir que as zonas com trações superiores à resistência à tração aumentam, sendo certamente mais intensa a fissuração de certas zonas da barragem. Por outro lado, e da mesma forma que se procedeu no modelo de Projeto, a escala na figura 5.20 também foi alterada, de modo a ser mais perceptível o mapa de compressões da barragem. Consta-se que o ponto angularo cria um pico de tensões numa área localizada, sendo que a maioria da estrutura possui compressões na ordem dos 7.5 aos 10 MPa.

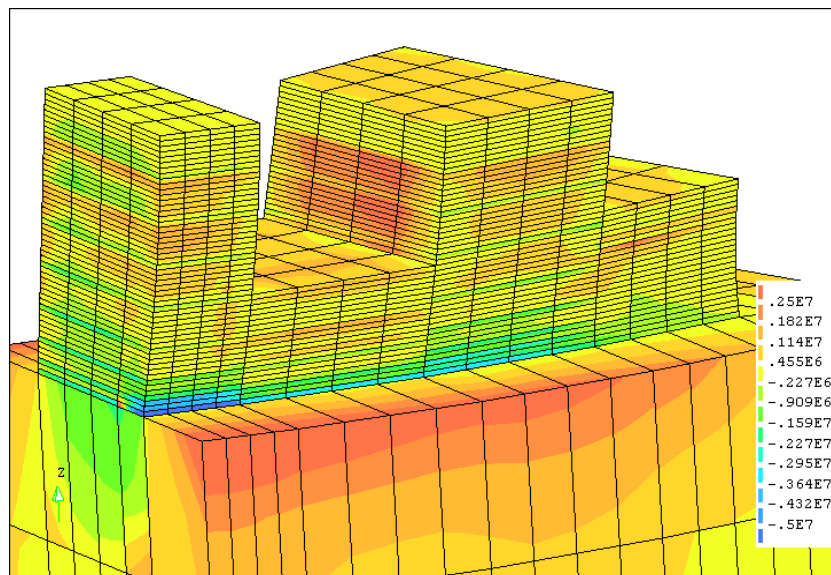


Fig.5.19 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo Alterado na fase 25

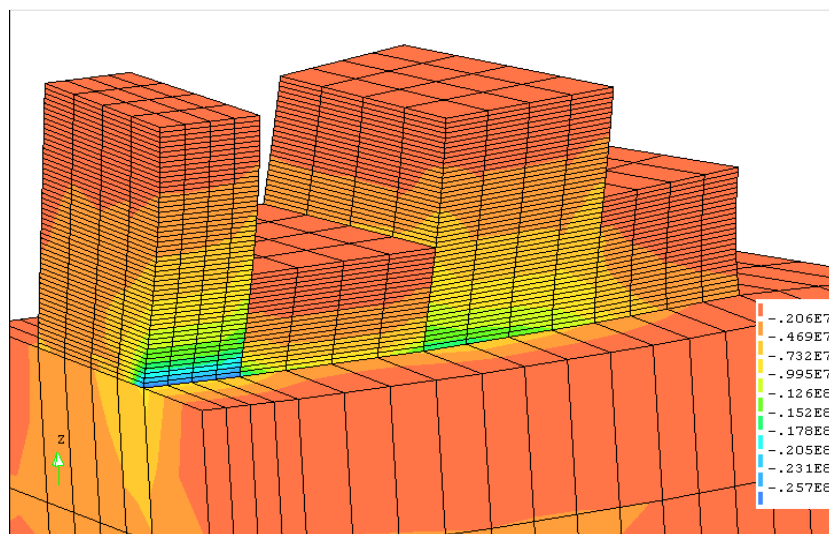


Fig.5.20 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo Alterado na fase 25 – Escala Alterada

5.4 MODELO MODIFICADO

Uma vez que devido ao aumento da espessura das camadas de betonagem os resultados não são satisfatórios, optou-se por definir um novo modelo que representa de uma forma mais realistas as alterações que deveriam ser adotadas, como por exemplo o aumento do arrefecimento artificial do betão. Assim, procedeu-se a uma alteração da curva adiabática do betão utilizado no modelo, diminuindo a temperatura final obtida em 8° C. O gráfico seguinte representa as três curvas adiabáticas utilizadas. A mais elevada corresponde ao betão sem o efeito das serpentinas. A intermédia, a um arrefecimento de 4.5° C e a inferior, que irá ser utilizada neste último modelo, corresponde a um arrefecimento de 8° C.

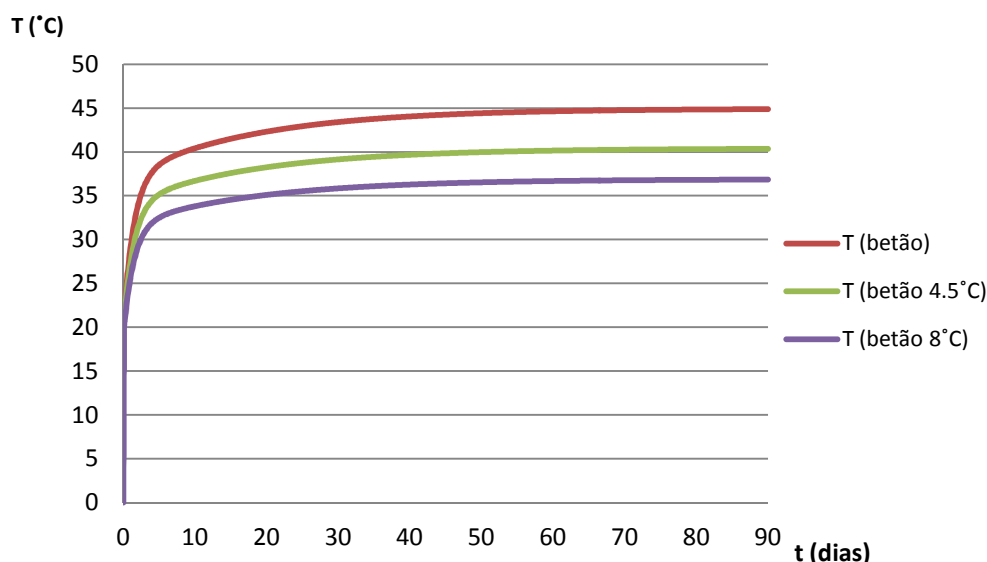


Fig.5.21 – Curva Adiabática do Betão – Aumento arrefecimento artificial

As imagens seguintes representam os resultados obtidos dos modelos térmico e mecânico do Modelo Alterado, substituindo a curva adiabática do betão pela curva representada no gráfico anterior. A fase representada refere-se a uma etapa avançada da obra.

No Modelo Alterado as temperaturas máximas atingidas para a mesma fase são de 42.4° C, enquanto no Modelo Modificado as temperaturas máximas atingidas correspondem a valores de 38.9° C, como se consegue verificar na figura 5.22.

Em relação às tensões verifica-se que as gamas de trações obtidas, ver figura 5.23, são bastante mais próximas do valor da resistência à tração do betão utilizado, visualizando-se apenas pequenas áreas de tração igual a 2.5 MPa. Isto deve-se ao facto das temperaturas finais obtidas serem bastante inferiores.

Por outro lado, as compressões não sofrem alterações consideráveis, continuando a ser notória, como seria de prever, a influência do ponto anguloso no campo de compressões da estrutura, representado na figura 5.24.

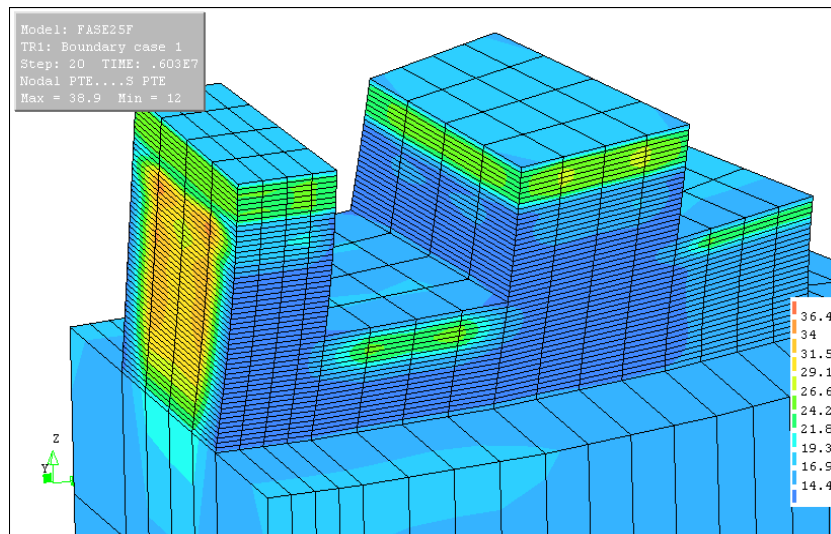


Fig.5.22 – Campo de Temperaturas do Modelo Modificado na fase 25

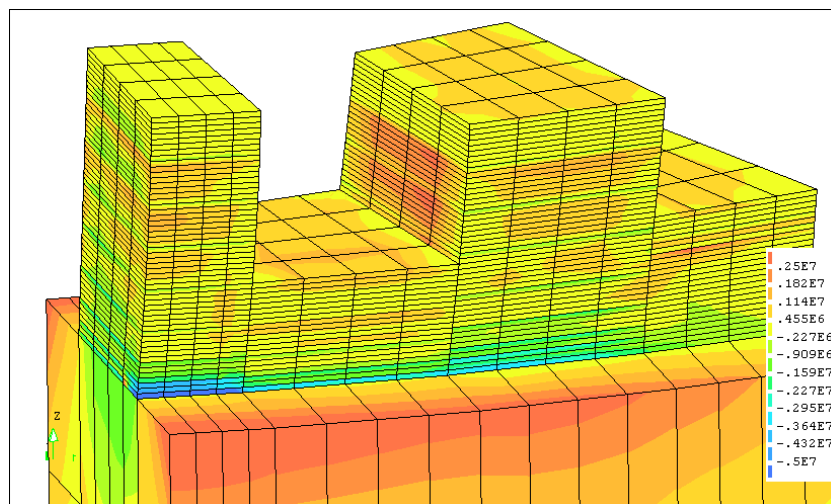


Fig.5.23 – Campo de Tensões σ_1 do Modelo Modificado na fase 25

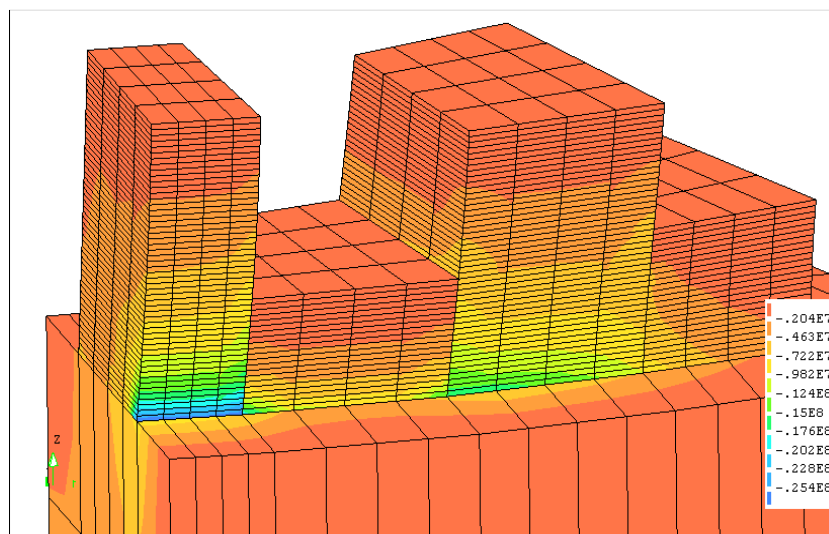


Fig.5.24 – Campo de Tensões σ_3 do Modelo Modificado na fase 25 – Escala Alterada

6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Nesta dissertação pretendeu-se fazer a análise estrutural da viabilidade de utilização de camadas de betonagem com 4 metros de espessura na construção de uma barragem abóbada, por comparação com a utilização de camadas de 2 metros. Este estudo iniciou-se com o procedimento de uma análise térmica, na qual o objetivo principal foi obter campos de temperatura devidos tanto ao calor libertado pela hidratação do cimento, como aos fenómenos de transferência de calor associados. Seguidamente, realizou-se uma análise mecânica, tendo em consideração os resultados obtidos na análise térmica e as cargas a que a estrutura está sujeita.

Nestas análises foram estudados os efeitos térmicos devido à hidratação do cimento, como a evolução das propriedades resistentes do betão, nomeadamente módulo de elasticidade, resistência à tração e à compressão. Também foram estudados efeitos devidos à fluência, retração e maturação.

Na presente dissertação foram analisadas alterações ao plano de betonagem da estrutura, fazendo variar a espessura das camadas de betonagem. Elaboraram-se, assim, dois modelos comparáveis possuindo a mesma geometria mas adotando diferentes planos de betonagem.

O primeiro modelo corresponde ao plano de betonagem adotado na construção da barragem, com espessura máxima das camadas de betonagem de 2 metros. O segundo modelo foi definido com base nos tempos de betonagem do primeiro, aumentando a espessura das camadas para 4 metros.

Optou-se pela utilização de modelos volúmicos, definindo a geometria real da barragem, sendo a sua análise faseada. O primeiro modelo, pelo facto de ser construído com camadas de betonagem de dimensão inferior, apresenta maior número de fases construtivas que o segundo. Importa referir que esta alteração introduz uma redução do tempo de construção de quase 2 meses, sendo, desta forma, possível apercebermo-nos das vantagens desta alteração quando aplicada a uma parte significativa da barragem.

O betão utilizado é da classe de resistência C16/20, constituído por uma mistura de cimento CEM I 42.5 R e cinzas volantes sílico aluminosas, nas proporções 50% + 50%. Esta alteração reduz substancialmente o calor de hidratação, não colocando em causa a resistência pretendida. No modelo, estimou-se a fluência através da Lei da Dupla Potência e desprezaram-se os efeitos da retração por se tratar de uma análise de curta duração.

Considerou-se que a temperatura de betonagem é constante ao longo de todo o processo construtivo, com o respetivo valor de 20° C. Atribui-se à fundação uma temperatura igual à temperatura média anual do ar, isto é, 15.6° C. A função de geração de calor foi definida através da curva adiabática do

betão. A refrigeração artificial do betão foi introduzida através de uma redução na temperatura final obtida em condições adiabáticas de cerca de 4.5° C. Estudos apresentados ao longo da dissertação demonstram que a simplificação considerada é válida, não afetando os resultados obtidos.

Os parâmetros térmicos dos materiais foram definidos com base em estudos semelhantes. O calor específico do betão foi suposto igual a 2400 kJm³K⁻¹ e a condutibilidade térmica igual a 2.6 Wm⁻¹K⁻¹. Por outro lado, para o maciço de fundação considerou-se que se tratava de um maciço puramente granítico definindo como calor específico do granito o valor de 2040 kJm³K⁻¹ e condutibilidade térmica o valor de 2.79 Wm⁻¹K⁻¹.

No tratamento das superfícies fronteira verticais considerou-se a existência de cofragem nos 7 primeiros dias após a betonagem, variando o valor do coeficiente de convecção de 5.4 Wm⁻²K⁻¹ para 15 Wm⁻²K⁻¹. Nas superfícies fronteira horizontais, devido à existência de isolamentos, adotou-se um coeficiente de convecção intermédio de valor 10 Wm⁻²K⁻¹.

Através dos mapas de temperaturas verifica-se que no Modelo Alterado se obtêm temperaturas bastante superiores às do Modelo de Projeto.

Conclui-se que o Modelo de Projeto apresenta campos de tensões bastante satisfatórios, não estando em causa a segurança estrutural da barragem. Por outro lado, no Modelo Alterado esta segurança já não é garantida devido à existência de grandes áreas, nas quais pode ocorrer fissuração.

Como tal, foi analisado o benefício de se considerar uma redução da temperatura atingida pelo betão, representativa de um aumento do arrefecimento artificial e da diminuição da temperatura de colocação do betão. Definindo-se assim, o Modelo Modificado com camadas de 4 metros, que apresenta trações com valores mais satisfatórios, na medida em que as gamas de tração, apesar de superiores, estão muito próximas da resistência à tração do betão em causa.

Importa referir que a zona da barragem escolhida para a elaboração deste estudo engloba a zona mais espessa da abóbada e, portanto, a zona em que há maior acumulação de calor. Sendo assim, os resultados obtidos estão do lado da segurança, visto que, o local mais adequado para a alteração da espessura das camadas de betonagem ocorre a cotas mais elevadas, onde a espessura é substancialmente inferior.

Desta forma, pode concluir-se, que se o fabrico do betão for ajustado de modo a baixar a sua temperatura de colocação, se as condições de cura forem mais propícias e, ainda, se existir um maior rigor e monitorização do processo construtivo é possível atingir espessuras de camadas de betonagem na ordem dos 4 metros no processo de construção de barragens abóbada.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em consideração as simplificações e incertezas introduzidas num estudo deste género, apresentam-se seguidamente alguns temas que poderiam ser aprofundados com vista a obter resultados que traduzam com mais certeza o que acontece na realidade:

- Os tempos de espera e condições de cura do Modelo Alterado devem ser adaptados, tentando traduzir de forma mais realista o que aconteceria no processo construtivo utilizado. Isto deve-se ao facto de o Modelo Alterado adotar o mesmo mapa de colocação do betão do Modelo de Projeto, o que representa uma velocidade de construção aproximadamente dupla da realizada, o que é fortemente penalizante;
- Os modelos a desenvolver devem apoiar-se em ensaios laboratoriais, tentando caracterizar corretamente o betão utilizado em obra, não só a evolução das suas características resistentes, mas também a fluência, a retração e a maturação;
- A localização dos apoios e a interação entre o betão e a fundação também deveriam ser definidas com maior rigor;
- Os parâmetros correspondentes aos coeficientes de convecção das superfícies fronteira, ainda que baseados em estudos semelhantes, deveriam ser verificados.
- Os pontos singulares da estrutura, como pontos angulosos e limites fronteira da fundação, devem ser modelados com mais rigor com o objetivo de harmonizar os erros introduzidos nos campos de tensões.

BIBLIOGRAFIA

- Azenha, Miguel, Faria, Rui. *Temperatures and Stresses due to cement hydration on the R/C foundation of a wind tower – A case study*. Engineering Structures 30, 2008, 2392-2400, ELSEVIER.
- Azenha, Miguel. *Comportamento do Betão nas Primeiras Idades. Fenomenologia e Análise Termomecânica*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2004.
- Azenha, Miguel. *Numerical Simulation of the Structural Behavior of Concrete since its early ages*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2009.
- Azenha, M., Faria, R., Figueiras, H. *Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete*. Construction and Building Materials, 2011.
- Batista, António. *Análise do Comportamento ao longo do tempo de Barragens Abóbada*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 1998.
- Brooks, Andrew, Schindler, Anton. *Maturity Method Evaluated for Various Cementitious Materials*. Journal of Material in Civil Engineering, 2007, 1017-1025, ASCE.
- Bureau of Reclamation. *Control of Cracking in Mass Concrete Structures*. United States Departement of Interior, 1981.
- Bureau of Reclamation. *Cooling of Mass Concrete by Water Flowing in Embedded Pipes*. United States Departement of Interior, 1946.
- Carino, N. J. The maturity method – *CRC handbook on nondestructive testing of concrete*, V. M. Malhotra and N. J. Carino eds., Chap. 5, CRC, Boca Raton, Fla., 101–146, 1991.
- Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB). Instituto da Água (INAG).
- Conceição, José, Faria, Rui. *Estudo térmico nas primeiras idades do envolvimento em betão da espiral de uma turbina*. Encontro Nacional de Betão Estrutural, FEUP.
- Early-Age Shrinkage of Concrete*. June 2005, Cement Concrete and Aggregates, Australia.
- EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A., *Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor – Empreitada Geral de Construção*, 2007.
- Eierle, B., Schikora, K. *Computational Modeling of Concrete at Early Ages using DIANA*. Institut für Statik, Baumechanik und Bauinformatik, TU München.
- Faria, Rui. *Análise Numérica de Barragens Abóbada Sujeitas à Ação Sísmica*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1988.
- Faria, R., Azenha, M., Figueiras, F. *Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab*. Cement & Concrete Composites, 28, pp. 572-582, 2006.
- Ferreira, Denise, Azenha, Miguel. *Monitorização do Comportamento do Betão nas Primeiras Idades: Validação Experimental de Modelos Numéricos*. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, 2008, 25-37, APAET Mecânica Experimental.
- Genésio, Mário. *Simulação do Comportamento de Juntas de Barragens*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1993.
- Jesus, João. *Barragens Abóbada em Betão Compactado com Cilindros*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.

- Jesus, Rafael. *Otimização da Forma Estrutural de uma Barragem*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011.
- Ji, Shun, Zhu, Yue-ming. *Effect of Internal and External Constraints and Creep on Concrete Cracking Stress*. College of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering, Hohai University, Nanjing, China, 2008.
- Kataoka, Luciana. *Análise da Deformabilidade por Fluência e Retração e sua utilização na Monitoração de Pilares de Concreto*. Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, 2010.
- Kolnbrein. Austrian National Committee on Large Dams (ANCLD), 2011.
- Koschenz, Markus, Dorer, Viktor. *Interaction of an air system with concrete core conditioning*. Energy and Buildings 30, 1999, 139-145, ELSEVIER.
- Lee, Y., [et al.]. *Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early age concrete*. Cement & Concrete Composites, 31, pp. 60-71, 2009.
- Mass Concrete. ACI 207.1 R-96, 1997, American Concrete Institute.
- Meliço, José. *Escolha de Formas de Barragens Abóbada*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- Myres, T., Fowkes, N. *Modeling the Cooling of Concrete by Piped Water*. UAB Science Faculty.
- Pagitsch, Manuel. *Arch Dam Design and Optimization*. Dissertação de Mestrado, Graz University of Technology, 2012.
- Schindler, Anton. *Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials*. ACI Materials Journal, 2005, 72-81.
- Silva, Luís. *Caracterização das Propriedades Termomecânicas do Betão nas Primeiras Idades para Aplicação Estrutural*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2007.
- Silveira, António. *A influência das ações térmicas no comportamento de pontes de betão armado*, LNEC, 1996.
- Silveira, António. *As Variações de Temperaturas nas Barragens*, LNEC, 1961.
- Soares, José. *Dimensionamento das Armaduras de Envolvimento de um Grupo do Gerador de Central Hidrelétrica*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2012.
- Sousa, Ricardo. *Aproveitamento Hidroelétrico de Baixo Sabor – Estudo de Caso*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011.
- Stucky, Alfred, Derron, Maurice-H. *Problèmes Thermiques Posés Par la Construction des Barrages-Réservoirs*, École Polytechnique de L'Université de Lausanne, 1957.
- Teles, Madalena. *Comportamento Térmico de Barragens de Betão*. Dissertação de Doutorado, FEUP, 1985.
- The Physical Properties of Hardened Conventional Concrete in Dams*. Committee on Concrete Dams, 1997, ICOLD.
- Three Gorges Project*. Chinese National Committee on Large Dams (CNCLD), 2011.
- Wang, X., Lee, H. *Simulation of a temperature rise in concrete incorporating fly ash or slag*. Materials and Structures, 43, pp. 737-754, 2010.

Wang, L., et al., *Numerical simulation of temperature effect of concrete hydration*. Key Engineering Materials, pp. 483-488, 2009.

Xie, Zhi-qiang, Qiang, Sheng. *Development of Simulation and Analysis Software of Temperature Control for Massive Concrete Construction*. 2010 Second WRI World Congress in Software Engineering, 2010, 233-236, IEEE Computer Society.

Yulin, Lu, Tao, Lu. *Numerical Analysis of the Convective Coefficient on Cooling Water Pipe Embedded in Concrete*. International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, 2011, 3349-3352, IEE.

ANEXOS

PLANO DE BETONAGEM MODELO DE PROJETO

1º BLOCO				2º BLOCO				3º BLOCO				4º BLOCO											
Fase	Esp.	Dia/Mês	Cota Inicial	Fase	Esp.	Dia/Mês	Cota Inicial	Fase	Esp.	Dia/Mês	Cota Inicial	Fase	Esp.	Dia/Mês	Cota Inicial								
1	0.5	24-Jan	113					2	0.5	25-Jan	114												
3	1	01-Fev	113.5					4	0.5	02-Fev	114.5												
5	1	09-Fev	114.5					6	0.5	11-Fev	115												
7	1.5	18-Fev	115.5					8	1	21-Fev	115.5												
9	2	26-Fev	117	10	0.5	01-Mar	113	11	1	03-Mar	116.5												
12	2	07-Mar	119	12	0.5	07-Mar	113.5	13	1.5	12-Mar	117.5												
14	2	16-Mar	121	15	1	17-Mar	114	16	2	22-Mar	119												
17	2	25-Mar	123	18	1	28-Mar	115	19	2	01-Abr	121												
20	2	02-Abr	125	21	2	09-Abr	116																
22	2	11-Abr	127					22	2	11-Abr	123												
23	2	19-Abr	129	24	2	20-Abr	118	25	2	21-Abr	125					26	0.5	26-Abr	122				
27	2	27-Abr	131	28	2	02-Mai	120	28	2	02-Mai	127					29	0.5	03-Mai	122.5				
30	2	06-Mai	133	31	2	12-Mai	122									33	2	14-Mai	129	32	0.5	13-Mai	123
34	1.5	16-Mai	135	35	2	23-Mai	124	35	2	23-Mai	131					35	1	23-Mai	123.5				
36	1	27-Mai	136.5	37	2	02-Jun	126													37	1	02-Jun	124.5
								38	2	03-Jun	133												
39	1	06-Jun	137.5	40	2	11-Jun	128	40	1.5	11-Jun	135	41	1	13-Jun	125.5								
42	0.5	18-Jun	138.5									43					2	20-Jun	130	43	2.5	20-Jun	136.5

PLANO DE BETONAGEM MODELO ALTERADO

1º BLOCO				2º BLOCO				3º BLOCO				4º BLOCO			
Fase	Esp.	Dia/Mês	Cota Inicial	Fase	Esp.	Dia/Mês	Cota Inicial	Fase	Esp.	Dia/Mês	Cota Inicial	Fase	Esp.	Dia/Mês	Cota Inicial
1	0.5	24-Jan	113					2	0.5	25-Jan	114				
3	1	01-Fev	113.5					4	1	02-Fev	114.5				
5	2	09-Fev	114.5					6	2	11-Fev	115				
7	3	18-Fev	115.5	8	0.5	19-Fev	113	9	3	21-Fev	115.5				
10	4	26-Fev	117	11	1	27-Fev	113.5	12	4	03-Mar	116.5				
13	4	07-Mar	119	14	2	10-Mar	114	15	4	12-Mar	117.5	16	0.5	14-Mar	122
17	4	16-Mar	121	18	3	20-Mar	115	19	4	22-Mar	119	20	1	23-Mar	122.5
21	4	25-Mar	123	22	4	27-Mar	116	24	4	01-Abr	121	23	2	29-Mar	123
25	4	02-Abr	125	26	4	06-Abr	118	28	3.5	11-Abr	123	27	3	07-Abr	123.5
				29	4	14-Abr	120								

DATAS DE BETONAGEM DAS CAMADAS

Junta	5	12	23	34	45	56	67	78	89	100	111	122	133	144	155	166	177	188	199	210	221	232	243	254	265	276	287	298	309	320	331	342	353	364	375	386	397	408	419	430	441	452	463	474	485	496	507	518	529	540	551	562	573	584	595	606	617	628	639	650	661	672	683	694	705	716	727	738	749	760	771	782	793	804	815	826	837	848	859	870	881	892	903	914	925	936	947	958	969	980	991	1002	1013	1024	1035	1046	1057	1068	1079	1090	1101	1112	1123	1134	1145	1156	1167	1178	1189	1200	1211	1222	1233	1244	1255	1266	1277	1288	1299	1310	1321	1332	1343	1354	1365	1376	1387	1398	1409	1420	1431	1442	1453	1464	1475	1486	1497	1508	1519	1530	1541	1552	1563	1574	1585	1596	1607	1618	1629	1640	1651	1662	1673	1684	1695	1706	1717	1728	1739	1750	1761	1772	1783	1794	1805	1816	1827	1838	1849	1860	1871	1882	1893	1904	1915	1926	1937	1948	1959	1970	1981	1992	2003	2014	2025	2036	2047	2058	2069	2080	2091	2102	2113	2124	2135	2146	2157	2168	2179	2190	2201	2212	2223	2234	2245	2256	2267	2278	2289	2300	2311	2322	2333	2344	2355	2366	2377	2388	2399	2410	2421	2432	2443	2454	2465	2476	2487	2498	2509	2520	2531	2542	2553	2564	2575	2586	2597	2608	2619	2630	2641	2652	2663	2674	2685	2696	2707	2718	2729	2740	2751	2762	2773	2784	2795	2806	2817	2828	2839	2850	2861	2872	2883	2894	2905	2916	2927	2938	2949	2960	2971	2982	2993	3004	3015	3026	3037	3048	3059	3070	3081	3092	3103	3114	3125	3136	3147	3158	3169	3180	3191	3202	3213	3224	3235	3246	3257	3268	3279	3290	3301	3312	3323	3334	3345	3356	3367	3378	3389	3400	3411	3422	3433	3444	3455	3466	3477	3488	3499	3510	3521	3532	3543	3554	3565	3576	3587	3598	3609	3620	3631	3642	3653	3664	3675	3686	3697	3708	3719	3730	3741	3752	3763	3774	3785	3796	3807	3818	3829	3840	3851	3862	3873	3884	3895	3906	3917	3928	3939	3950	3961	3972	3983	3994	4005	4016	4027	4038	4049	4060	4071	4082	4093	4104	4115	4126	4137	4148	4159	4170	4181	4192	4203	4214	4225	4236	4247	4258	4269	4280	4291	4302	4313	4324	4335	4346	4357	4368	4379	4390	4401	4412	4423	4434	4445	4456	4467	4478	4489	4500	4511	4522	4533	4544	4555	4566	4577	4588	4599	4610	4621	4632	4643	4654	4665	4676	4687	4698	4709	4720	4731	4742	4753	4764	4775	4786	4797	4808	4819	4830	4841	4852	4863	4874	4885	4896	4907	4918	4929	4940	4951	4962	4973	4984	4995	5006	5017	5028	5039	5050	5061	5072	5083	5094	5105	5116	5127	5138	5149	5160	5171	5182	5193	5204	5215	5226	5237	5248	5259	5270	5281	5292	5303	5314	5325	5336	5347	5358	5369	5380	5391	5402	5413	5424	5435	5446	5457	5468	5479	5490	5501	5512	5523	5534	5545	5556	5567	5578	5589	5600	5611	5622	5633	5644	5655	5666	5677	5688	5699	5710	5721	5732	5743	5754	5765	5776	5787	5798	5809	5820	5831	5842	5853	5864	5875	5886	5897	5908	5919	5930	5941	5952	5963	5974	5985	5996	6007	6018	6029	6040	6051	6062	6073	6084	6095	6106	6117	6128	6139	6150	6161	6172	6183	6194	6205	6216	6227	6238	6249	6260	6271	6282	6293	6304	6315	6326	6337	6348	6359	6370	6381	6392	6403	6414	6425	6436	6447	6458	6469	6480	6491	6502	6513	6524	6535	6546	6557	6568	6579	6590	6601	6612	6623	6634	6645	6656	6667	6678	6689	6700	6711	6722	6733	6744	6755	6766	6777	6788	6799	6810	6821	6832	6843	6854	6865	6876	6887	6898	6909	6920	6931	6942	6953	6964	6975	6986	6997	7008	7019	7030	7041	7052	7063	7074	7085	7096	7107	7118	7129	7140	7151	7162	7173	7184	7195	7206	7217	7228	7239	7250	7261	7272	7283	7294	7305	7316	7327	7338	7349	7360	7371	7382	7393	7404	7415	7426	7437	7448	7459	7470	7481	7492	7503	7514	7525	7536	7547	7558	7569	7580	7591	7602	7613	7624	7635	7646	7657	7668	7679	7690	7701	7712	7723	7734	7745	7756	7767	7778	7789	7800	7811	7822	7833	7844	7855	7866	7877	7888	7899	7910	7921	7932	7943	7954	7965	7976	7987	7998	8009	8020	8031	8042	8053	8064	8075	8086	8097	8108	8119	8130	8141	8152	8163	8174	8185	8196	8207	8218	8229	8240	8251	8262	8273	8284	8295	8306	8317	8328	8339	8350	8361	8372	8383	8394	8405	8416	8427	8438	8449	8460	8471	8482	8493	8504	8515	8526	8537	8548	8559	8570	8581	8592	8603	8614	8625	8636	8647	8658	8669	8680	8691	8702	8713	8724	8735	8746	8757	8768	8779	8790	8801	8812	8823	8834	8845	8856	8867	8878	8889	8900	8911	8922	8933	8944	8955	8966	8977	8988	8999	9010	9021	9032	9043	9054	9065	9076	9087	9098	9109	9120	9131	9142	9153	9164	9175	9186	9197	9208	9219	9230	9241	9252	9263	9274	9285	9296	9307	9318	9329	9340	9351	9362	9373	9384	9395	9406	9417	9428	9439	9450	9461	9472	9483	9494	9505	9516	9527	9538	9549	9560	9571	9582	9593	9604	9615	9626	9637	9648	9659	9670	9681	9692	9703	9714	9725	9736	9747	9758	9769	9780	9791	9802	9813	9824	9835	9846	9857	9868	9879	9890	9901	9912	9923	9934	9945	9956	9967	9978	9989	10000
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Junta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			

[illegible]